

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Mostová měření pasivních elektrických veličin-
laboratorní úloha
Bridge Measurement of Passive Electrical Values –
Laboratory Exercise

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Karolina Ryšánková**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik
Téma: **Mostová měření pasivních elektrických veličin – laboratorní úloha**
Bridge Measurement of Passive Electrical Values – Laboratory Exercise

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s principy mostových měření pasivních elektrických veličin a se zapojením jednotlivých měřicích můstků.
2. Návrh koncepce úloh pro výuku mostových měření.
3. Návrh obvodového řešení přípravku s měřicími můstky.
4. Návrh a realizace DPS pro navržený měřicí přípravek.
5. Oživení a testování realizovaného měřicího přípravku.
6. Vytvoření úloh pro mostová měření pasivních elektrických veličin.
7. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: Přístroje a metody*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
[2] BARTUŠEK, Karel et al. *Měření v elektrotechnice*. 2. vyd. Brno: VUTUM, 2010. 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
[3] KRÍŠŤAN, Luděk a Vladimír VACHALA. *Příručka pro navrhování elektronických obvodů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1982. 400 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Kašík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2015




doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně a uvedla všechny zdroje, literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě, dne 7. května 2015


.....**Poděkování**

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladimíru Kašíkovi PhD. za odborné vedení, cenné rady a věcné připomínky při zpracování bakalářské práce.

Abstrakt

Zadáním této bakalářské práce je návrh a realizace můstkového měřícího přípravku, který bude schopen měřit pasivní veličiny jako je odpor a kapacita daných součástek. Teoretická část práce se zabývá jednotlivými typy můstkových zapojení pro každou pasivní veličinu zvlášť. Tato část je doplněna i o základní schémata zapojení a vzorce pro výpočet dalších důležitých prvků v těchto zapojeních. V praktické části je uveden návrh schématu pro měřící přípravek z lineárních prvků, zhotovení desky plošných spojů a návrh odporové a kapacitní dekády. Část testování je zaměřena na přesnost měření oproti hodnotám udávané výrobcem daných součástek.

Klíčová slova

Můstek, dekáda, nulový indikátor

Abstract

The goal of this bachelor's thesis is the design and realization of a bridge circuit which will be capable of measuring passive variables such as resistance and capacitance of given components. Theoretical part of this thesis concerns individual types of bridge circuit connections for each of the passive variables. This part is supplemented by basic schemes of connections and a formula used for calculation of other important elements in these connections. The practical part focuses on design of schema, the construction of printed circuit board and the design of resistance and capacitance decades. The testing part focuses on the measuring accuracy where the outcome is compared to the value declared by the manufacturer of given component.

Key words

Bridge, decade, zero-indicator

Seznam použitých zkratek a symbolů:

R	Odpor
C	Kapacita
L	Indukčnost
U	Napětí
ΔR	Změna měřeného odporu
R_x	Měřený odpor
DPS	Deska plošného spoje

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Teoretický rozbor.....	2
2.1 Pasivní elektrické veličiny	2
2.2 Teorie obecného můstku	2
2.2.1 Základní dělení můstků	3
2.3 Můstkové metody pro měření odporu	3
2.3.1 Wheatstoneův můstek	3
2.3.1.1 Vyvážený Wheatstoneův můstek	3
2.3.2 Nevyvážený Wheatstoneův můstek	4
2.4 Thomsonův můstek	5
2.5 Můstkové metody pro měření kapacit	6
2.5.1 Scheringův můstek	7
2.5.2 Wienův můstek.....	8
2.6 Můstkové metody pro měření indukčnosti.....	9
2.6.1 Maxwell-Wienův můstek	9
3. Návrh řešení měřícího přípravku	10
3.1 Způsob zapojení můstku	10
4. Realizace.....	11
4.1 Celkový návrh měřícího přípravku	11
4.2 Obvodové prvky.....	12
4.2.1 Stabilizátor napětí.....	12
4.2.2 Generátor harmonického signálu	12
4.2.3 Operační zesilovač - invertující zapojení	13
4.2.4 Můstkové zapojení	13
4.2.5 Operační zesilovače	14
4.2.6 Synchronní usměrňovač	15
4.2.7 RC filtr	16
4.2.8 Nulový indikátor	16
4.2.9 Odporová dekáda	17
4.2.10 Kapacitní dekáda.....	18
4.3 Realizace desky plošných spojů můstkového přípravku	20
5. Testování měřícího přípravku.....	20
5.1 Průběh napětí obvodem.....	20
5.2 Měření odporu.....	21
5.2.1 Měření s odporovou dekádou XL6.....	21
5.2.2 Absolutní a relativní chyba měření odporu	23

5.2.3	Měření odporu na sestavené dekádě.....	25
5.3	Měření kapacity.....	26
5.3.1	Měření s originál dekádou C- BOX 01	26
5.3.2	Měření kapacity na sestavené kapacitní dekádě.....	28
6.	Laboratorní úloha	29
6.1	Cíl úlohy.....	29
6.2	Zadání.....	29
6.3	Použité vybavení	29
6.4	Teoretický rozbor	30
6.5	Pracovní postup.....	31
6.5.1	K bodu č. 1: sestavení měřícího přípravku.....	31
6.5.2	K bodu č. 2: měření hodnot součástí	31
6.5.2.1	Měření odporu.....	31
6.5.2.2	Měření kapacity.....	31
6.5.3	K bodu č. 3: hodnoty odporu přeměříte multimetrem.....	32
6.5.4	K bodu č. 4: Záznam hodnot	32
6.6	Výsledky měření	32
7.	Závěr.....	34
	Literatura.....	35
	Seznam obrázků	36
	Seznam grafů.....	38
	Seznam tabulek	39
	Seznam použitých vzorců	40
	Seznam příloh.....	41

1. Úvod

Hlavním cílem bakalářské práce je návrh a realizace můstkového měřícího přípravku, pomocí kterého bude měřena kapacita a odpor a následovně návrh laboratorní úlohy pro výuku. Celé měření by mělo demonstrovat ukázkou, jak můstkové měření funguje. Můstkové měřicí přístroje jsou většinou realizované pomocí digitální technologie, popřípadě zhotoveny pro každou veličinu zvlášť. Hlavním úkolem můstkových měření v praxi je přesnost měření. Pomocí kvalitních dekád lze dosáhnout přesnosti měření až 0,1%.

Princip měření spočívá v postupné změně napětí na můstku – dochází k vyvažování pomocí dekády. To znamená, že v ideálním případě při přesném nastavení měřené veličiny na dekádě, můstkem neprotéká žádné napětí. Tato hodnota na dekádě pak odpovídá měřené hodnotě dané součástky. Jako nulový indikátor se ve starších publikacích uvádí galvanometr, přesného určení nulového napětí lze však určit spíše digitálním voltmetrem. Celková přesnost měření záleží na návrhu prvků měřícího obvodu, zvolených součástkách a správném sestrojení.

V teoretické části práce je popsán celkový princip můstkového měření a obeznámení s různými typy můstkových zapojení, pro každou pasivní veličinu zvlášť. V praktické části je navržen měřicí přípravek pro měření elektrického odporu a kapacity.

2. Teoretický rozbor

2.1 Pasivní elektrické veličiny

Jedná se o veličiny, které popisují elektrické vlastnosti součástek, nebo popisují vlastnosti či chování obvodů.

Základními pasivními veličinami jsou – odpor, kapacita, indukčnost, ze kterých můžeme sestavit obecnou impedanci.

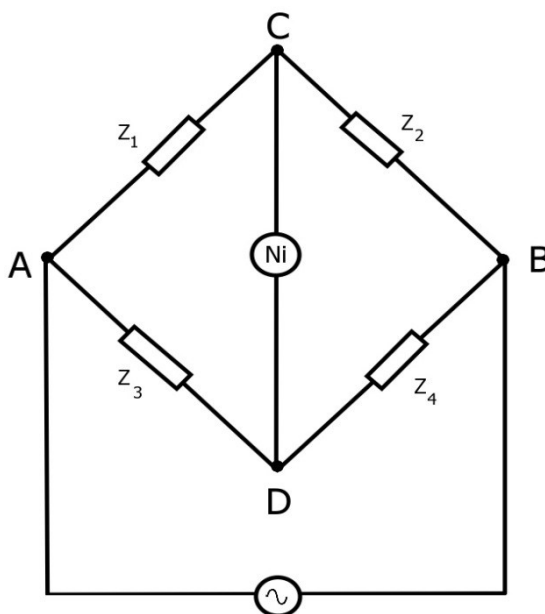
2.2 Teorie obecného můstku

Můstkové metody mají velmi širokou oblast použití. Můstky mohou být sestavené pro jednosměrné i střídavé napájení. Jednosměrné můstky se používají pro měření odporu, ale i pro měření neelektrických veličin, například teploty a tlaku. Střídavé můstky se využívají k měření kapacity, indukčnosti a vzájemné impedanci.

Základní funkce můstku je ta, že provede rozdíl signálu mezi dvěma body C-D - takže výstup je úměrný změnám, konstantní velké hodnoty se eliminují. Častým doplňkem můstků je zesilovač (u moderního snímače je přímo zabudován), jehož hlavním úkolem je zesílit malá rozdílová napětí, zmenšit výstupní impedanci a provést unifikaci výstupního signálu.

Obecný můstek Wheatstoneova typu viz (Obr. č.1) se skládá z impedancí Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 kde $Z_1 = Z_X$ je neznámá měřená impedance a Z_2, Z_3, Z_4 jsou známé hodnoty impedancí, z nichž minimálně 2 jsou proměnné. Pomocí těchto proměnných impedancí se provádí vyvážení můstku tak, že měříme jejich hodnoty tak dlouho dokud nulový indikátor neukáže nulovou výchylku napětí mezi body C a D.

[2, 3,6]



Obr. 1: Obecný můstek

Označení impedancí Z zde znamená, že mohou představovat jednotlivé součástky R , L , C a jejich kombinace.

2.2.1 Základní dělení můstků

- Stejnosměrné- zdroj napětí $U_B = 5 \div 10$ V, nebo zdroj proudu
- Střídavé \sim - $U_B = 1 \div 5$ V, $f = 5 \div 100$ kHz
- Impulzové – více můstků, jedna aparatura, přepínač
- Vyvážené – kompenzujeme odporem na 0 (kompenzační)
- Nevývážené – měříme velikost rozvážení můstku

2.3 Můstkové metody pro měření odporu

2.3.1 Wheatstoneův můstek

Wheatstoneův můstek je obvod používaný pro měření odporu a malých změn odporu. Můstek vynalezl roku 1833 britský vědec a matematik Samuel Hunter Christie (1784–1865), ale zdokonalil jej a popularizoval až roku 1843 britský fyzik a vynálezce Sir Charles Wheatstone (1802–1875). [2, 3]

Jedná se o můstek Wheatstoneova typu viz. Obr. 1. Tento můstek je vhodný pro měření střední velikosti odporu $10^0 \Omega - 10^5 \Omega$. Je tvořen čtyřmi rezistory a citlivým nulovým indikátorem, nejčastěji galvanometrem s poměrně malým vnitřním odporem. Hlavním požadavkem na tento můstek je přesnost a citlivost. Citlivost můstku závisí na citlivosti galvanometru, na napětí zdroje a na vzájemném odporu můstku. Přesnost můstku závisí na citlivosti můstku, na stálosti nulové výchylky galvanometru a na přesnosti rezistorů můstku. Citlivost můstku s galvanometrem je vyjádřena jako poměr změn výstupní veličiny a vstupní veličiny: [3,4]

$$C_{MG} = \frac{\Delta_\alpha}{\Delta_{RX}} = \frac{\Delta_\alpha}{\Delta_{IG}} \cdot \frac{\Delta_{IG}}{\Delta_{RX}} \quad (2.1)$$

C_{MG} citlivost můstku s galvanometrem

Δ_αvýchylka galvanometru

$\Delta_\alpha / \Delta_{IG}$ citlivost galvanometru

$\Delta_{IG} / \Delta_{RX}$citlivost můstku

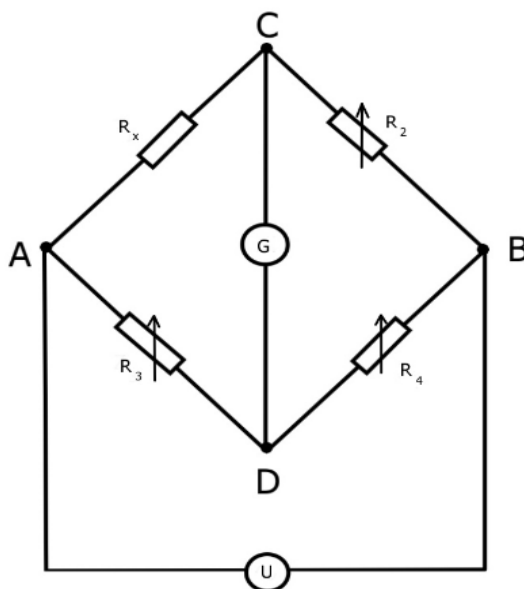
2.3.1.1 Vyvážený Wheatstoneův můstek

Vyvážený můstek viz (Obr. 2) umožňuje ze tří známých odporů stanovit velikost čtvrtého odporu. Měření probíhá tak, že vyvažujeme některým odporem můstek tak, aby napětí (či proud) na měřicí diagonále bylo nulové. Za odpor R_1 se většinou dosazuje měřený odpor, měření vyvažujeme pomocí rezistoru R_2 , obvykle odporové dekády. Rezistory R_3 a R_4 volíme v dekadických hodnotách, jejich poměr určuje měřicí rozsah můstku. Můstek je vyvážený ve chvíli,

kdy skrz nulový indikátor neprotéká žádný proud. Ten neprotéká ve chvíli, kdy mezi body A a B není žádné napětí. [1,2,7]

Podmínka rovnováhy :

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (2.2)$$



Obr. 2: Vyvážený Wheatstoneův můstek

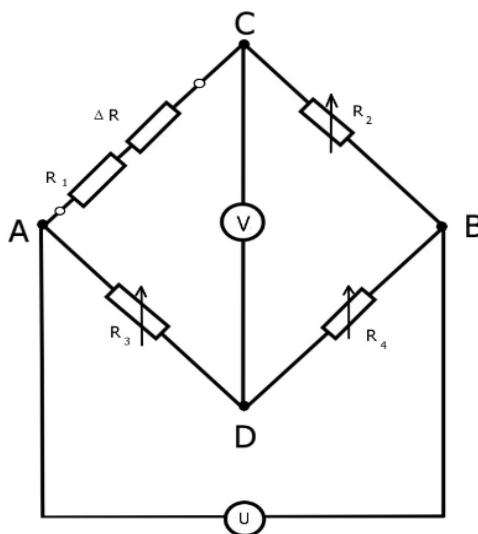
V případě vyváženého můstku nahrazujeme rezistor R_1 měřeným rezistorem R_x jehož velikost můžeme dále dopočítat ze vztahu:

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad (2.3)$$

Tímto vyvažováním se dosáhne velké přesnosti a citlivosti. Citlivost můstku s indikátorem vyvážení má být taková, aby nepřesnost v nastavení vyváženého stavu můstku nezhoršovala požadovanou přesnost měření, danou nepřesností jednotlivých odporů můstku.

2.3.2 Nevyvážený Wheatstoneův můstek

Tento typ můstku viz (Obr. 3) se nejčastěji používá v regulační technice při měření neelektrických veličin. Pro tyto účely stačí menší přesnost měření (0,1 – 1%) . Nulový indikátor je nahrazen analogovým nebo číslicovým voltmetrem případně dalšími obvody pro zpracování signálu. U tohoto typu můstku jsou výchylka a průběh stupnice přístroje závislé na velikosti napájecího napětí. Výstupní napětí je úměrné změně rezistoru R_1 , často senzoru neelektrické veličiny (odporový senzor tlaku, teploty) o hodnotu ΔR . Ostatní rezistory R_2, R_3, R_4 mají stejné hodnoty jako rezistor R_1 před změnou o ΔR . [2,4,6]



Obr. 3: Nevyvážený Wheatstoneův můstek

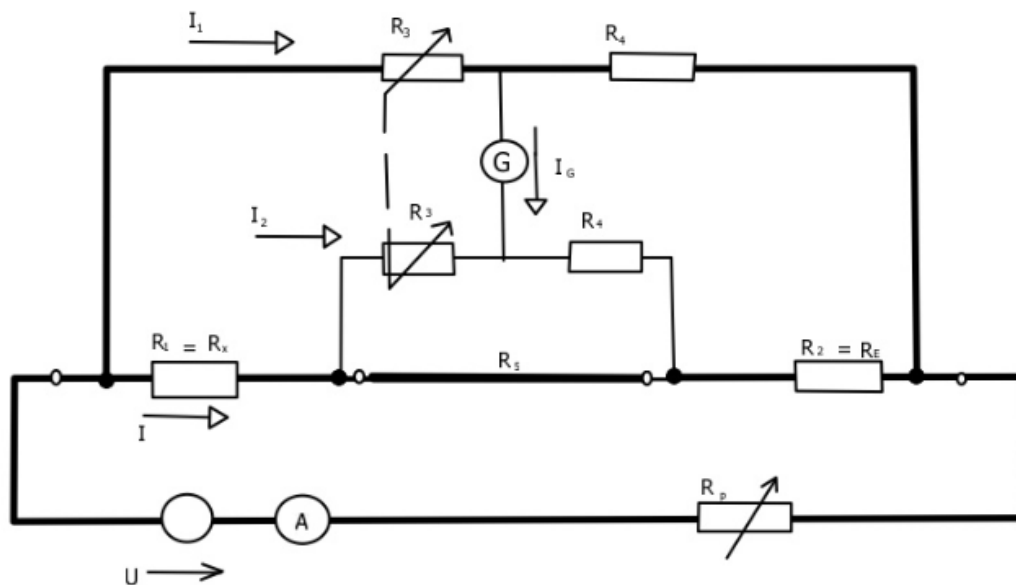
Vztah pro vyjádření napětí mezi body 1 a 2, v případě že je můstek napájen z napěťového zdroje:

$$U_{12} = U \cdot \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{R}{2R} \right) = \frac{U}{4R} \cdot \frac{\Delta R}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \quad (2.4)$$

Kde je: R.....Hodnota rezistorů nevyváženého můstku
 ΔRzměna měřeného odporu
U.....napětí zdroje

2.4 Thomsonův můstek

Thomsonův můstek je vhodný především pro měření malých odporů cca do 20Ω . Tímto dvojným můstkem můžeme měřit malé odpory ve čtyř svorkovém zapojení s přesností 0,1%. Eliminuje vliv parazitních odporů. Můstek je rozdělen na dvě části, kde proudová část sestává ze zdroje, měřeného rezistoru $x = R_1$, etalonu $R_E = R_2$, propojovacího vodiče s odporem R_5 , ampérmetru a pomocného odporu R_p . Napěťová část je tvořena rezistory R_3 , R_3' , a R_4 , R_4' . Při vyváženém můstku galvanometrem neteče proud a na jeho svorkách nesmí být napětí. [1]



Obr. 4: Thomsonův můstek [1]

Thomsonův můstek má dvě podmínky rovnováhy. První podmínka:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad (2.5)$$

Tato podmínka platí pouze s dodržáním i druhé podmínky:

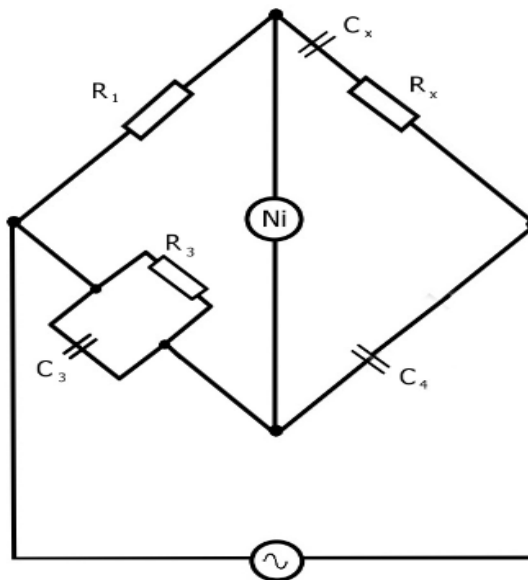
$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R'_3}{R'_4} \quad (2.6)$$

2.5 Můstkové metody pro měření kapacit

Pro měření kapacit se používají střídavé můstky. Zapojení je stejné, jak je uvedeno v teoretickém rozboru o obecném můstku. Jedná se o kombinace odporů a kapacit, které nahrazují v obecném můstku impedance.

2.5.1 Scheringův můstek

Tento typ zapojení viz (Obr. č. 5) se používá zejména při vysokém napětí. Měřený kondenzátor je nahrazený ideální kapacitou C_X a sériovým odporem R_X . Vyvažuje se odporovou dekádou R_3 a kapacitní dekádou C_3 . Scheringův můstek je kmitočtově nezávislý a proto s ním lze měřit i při frekvenci 50 Hz. Můstek se používá nejen k měření kapacity, ale také k měření ztrátového činitele a permitivity izolantů.



Obr. 5: Scheringův můstek

Podmínky rovnováhy jsou určeny ze vztahu:

$$\left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \right) \cdot \frac{R_3}{1 + j\omega C_3 \cdot R_3} = \frac{R_1}{j\omega C_4} \quad (2.7)$$

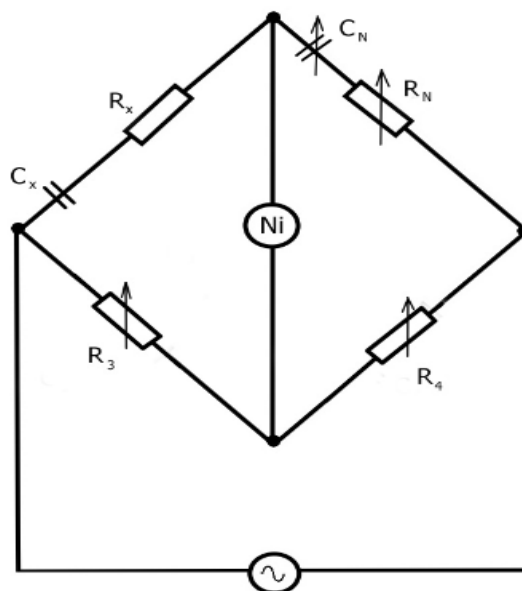
První podmínka:
$$C_X = C_4 \cdot \frac{R_3}{R_1} \quad (2.8)$$

[1, 2, 3]

Druhá podmínka:
$$R_X = R_1 \cdot \frac{C_3}{C_4} \quad (2.9)$$

2.5.2 Wienův můstek

Můstek je určený k měření kondenzátorů, které mají větší ztráty. V první větvi můstku je sériově zapojena bezztrátová kapacita C_X a ztrátový odpor R_X , který představuje ztráty kondenzátoru. Protože v druhé větvi můstku je kromě kapacitní i odporová dekáda, je možno můstek úplně vyvážit a splnit tak obě podmínky rovnováhy střídavého můstku. [1,2]



Obr. 6: Wienův můstek

Podmínka rovnováhy:

$$\left(R_X - \frac{j}{\omega C_X} \right) \cdot R_4 = \left(R_N - \frac{j}{\omega C_N} \right) \cdot R_3 \quad (2.10)$$

Z toho plyne první podmínka:

$$C_X = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (2.11)$$

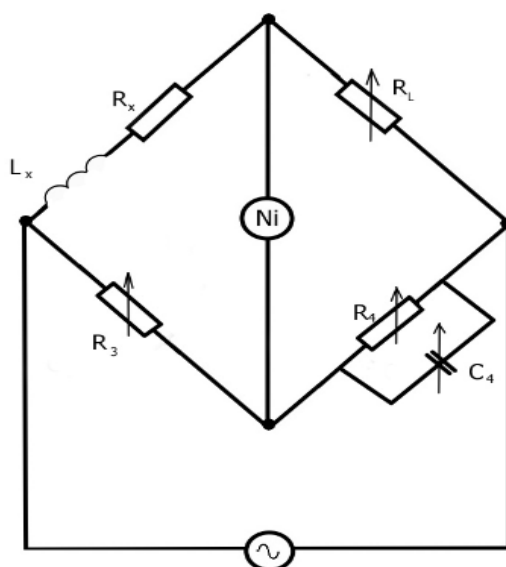
Druhá podmínka:

$$R_X = R_N \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad (2.12)$$

2.6 Můstkové metody pro měření indukčnosti

2.6.1 Maxwell-Wienův můstek

Maxwell-Wienůvo můstkové zapojení je velmi přesná metoda pro měření indukčnosti. Tento druh můstku je kmitočtově nezávislý. Při vyvažování můstku se snažíme proměnnými prvky nastavit minimální výchylku nulového indikátoru. Hodnoty veličin na pravých stranách vzorců pro R_x , L_x odečteme z nastavených hodnot vyvažovacích prvků.



Obr. 7: Maxwell-Wienův můstek

Podmínky rovnováhy určeny ze základní rovnice:

$$R_x + j\omega L_x = R_2 R_3 \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) \quad (2.13)$$

První podmínka:

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad (2.14)$$

Druhá podmínka:

$$L_x = R_2 R_3 C_4 \quad (2.15)$$

[1, 4]

3. Návrh řešení měřícího přípravku

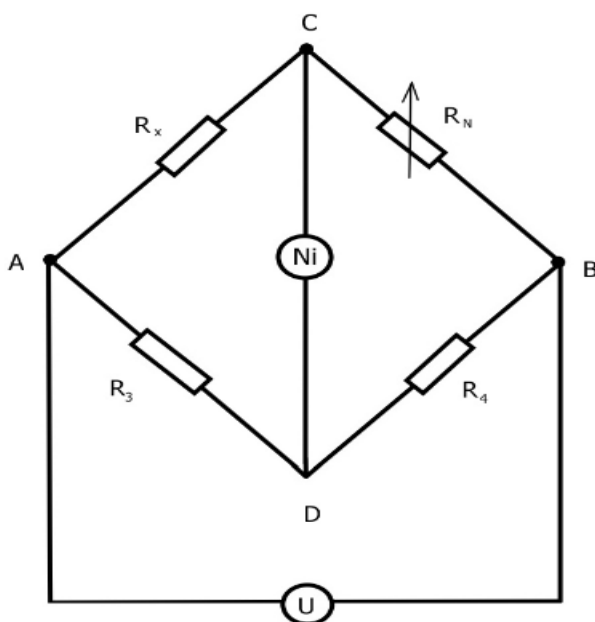
Aby práce splňovala požadavky, vytvoření měřícího přípravku můstkovou metodou pro měření odporu a kapacity, musely být dva typy můstku spojeny v jeden.

Pro měření odporu je v obvodu zařazena odporová dekáda a pro měření kapacity kapacitní dekáda.

3.1 Způsob zapojení můstku

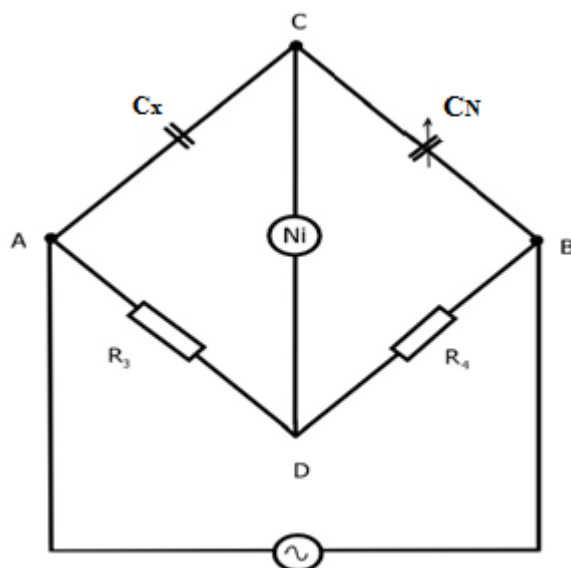
Celkový měřící přípravek je navržený podle dvou můstkových metod:

- Měření odporu – Wheastoneův můstek
- Měření kapacity – Wienův můstek



Obr. 8: Zapojení dle Wheatstoneova můstku pro měření odporu

V tomto zapojení představuje proměnný odpor R_N odporovou dekádu. Odpor R_x je měřený odpor. R_3 a R_4 jsou dva totožné odpory s pevnou hodnotou.



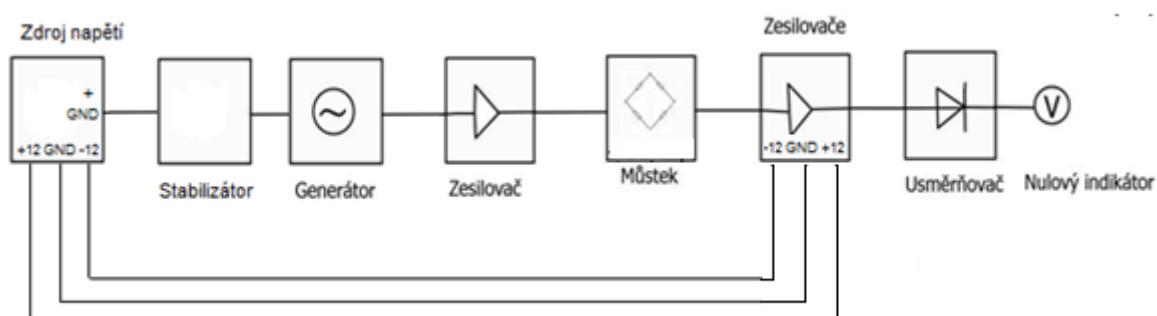
Obr. 9: Zapojení dle Wienova můstku pro měření kapacity

Zde C_x představuje měřenou kapacitu a C_N kapacitní dekádu .

4. Realizace

4.1 Celkový návrh měřícího přípravku

Celý měřicí přípravek je sestaven z několika částí, ty jsou uvedeny na Obr.10 v blokovém schématu. Přípravek je napájen laboratorním symetrickým zdrojem napětí $\pm 12V$. Jelikož samostatný generátor je napájen $+9V$, je k přípravku zařazen stabilizátor napětí. Tudiž lze celý přípravek napájet jedním zdrojem.

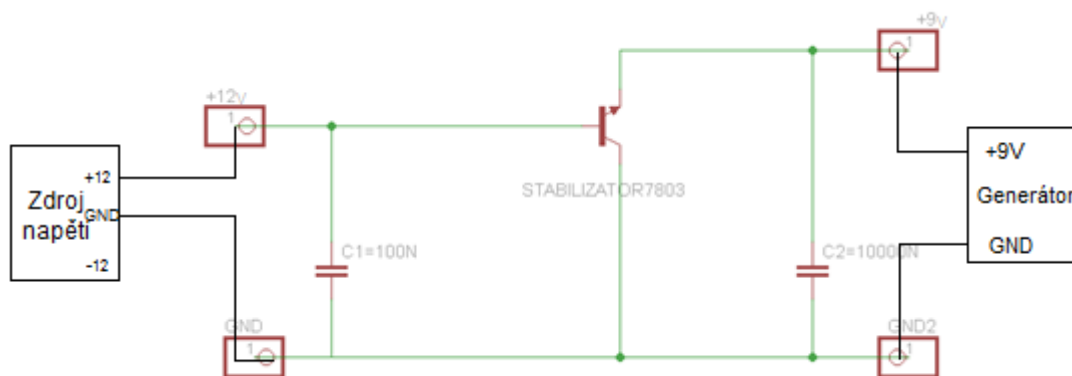


Obr. 10: Blokové schéma můstkového měřícího přípravku

4.2 Obvodové prvky

4.2.1 Stabilizátor napětí

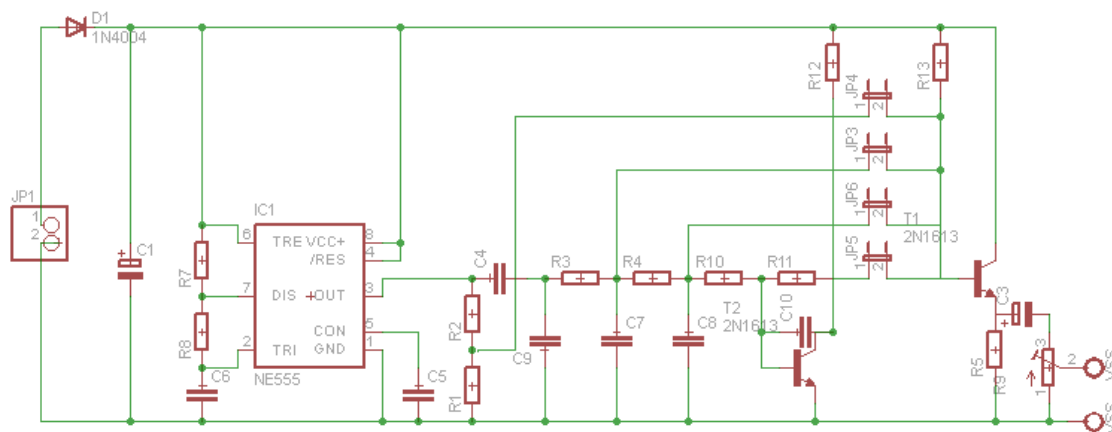
Jelikož samostatný generátor je napájen +9V, je k přípravku zařazen stabilizátor napětí. Celý přípravek lze napájet jedním zdrojem. Stabilizátor byl zvolen typu 7803 a k němu jsou přidány dva kondenzátory.



Obr. 11: Zapojení stabilizátoru

4.2.2 Generátor harmonického signálu

Pro buzení můstku je v obvodu zařazen generátor. Generátor je napájen laboratorním stejnosměrným zdrojem napětí 9V a je schopen generovat signál ve tvaru: trojúhelník, obdélník, sinus. V případě tohoto přípravku je na generátoru nastaven sinusový průběh. [5]



Obr. 12: Generátor harmonického signálu

4.2.3 Operační zesilovač - invertující zapojení

Je zařazen v obvodu hned za generátorem k zesílení napětí pro buzení můstku. Zesílení a výstupní napětí je dáno velikostí vstupního napětí dané generátorem a poměrem velikostí odporů v tomto zapojení.

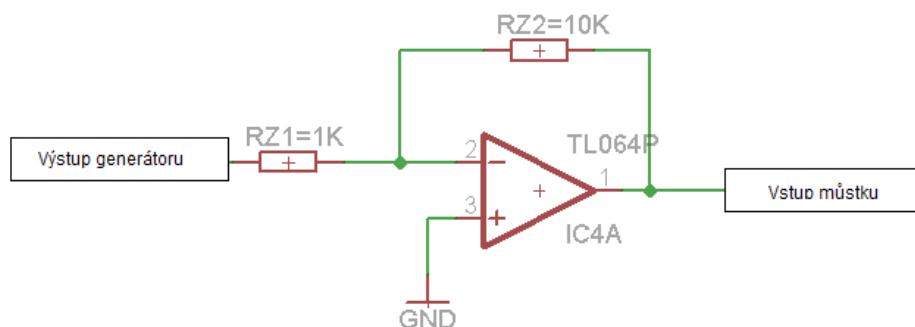
$$U_{vst} = 0,5V$$

$$R_{Z1} = 1k\Omega$$

$$R_{Z2} = 10k\Omega$$

Výstupní napětí:
$$U_{vyst} = - \left(\frac{R_{Z2}}{R_{Z1}} \right) \cdot U_{vstup} = -5V \quad (4.1)$$

Zesílení:
$$A_U = - \frac{R_{Z2}}{R_{Z1}} = -10 \quad (4.2)$$



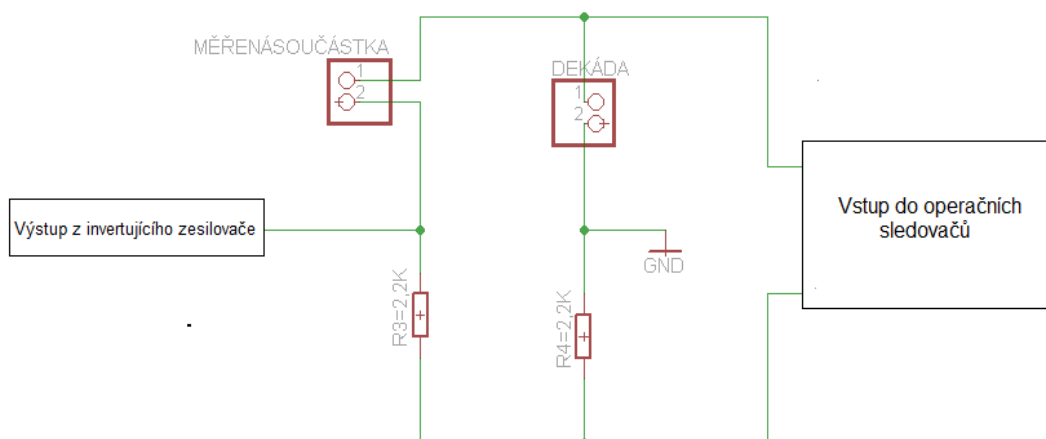
Obr. 13: Operační invertující zesilovač.

4.2.4 Můstkové zapojení

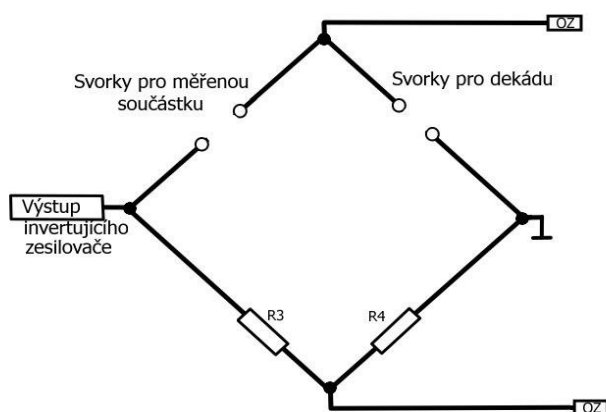
Konkrétní můstkové zapojení je principově založené na zapojení Wheastoneova můstku. Na Obr. 14 je návrh můstku v programu Eagl a na Obr 15. je pro pochopení principu zapojení tento obvod popsán na standartním nákresu Wheastoneova můstku.

V obvodu jsou zařazeny dva odpory stejné pevné hodnoty R_3 a R_4 , dále svorky pro měřenou součástku a svorky pro dekádu dle měřené veličiny (odpor nebo kapacita)

Hodnoty odporu R_3 a $R_4 = 2,2 k\Omega$



Obr. 14: Můstkové zapojení v měřicím přípravku



Obr. 15: Standartní zapojení

4.2.5 Operační zesilovače

V další části zapojení jsou zařazeny operační zesilovače - dva napěťové sledovače a diferenciální zesilovač. Napěťové sledovače slouží pouze jako prvek s velmi velkým vstupním odporem a tedy nezatěžují předchozí prvky obvodu a zároveň jsou schopny dodávat poměrně velký výstupní výkon. Celkové zesílení je díky bezodporové zpětné vazbě rovno jedné. Diferenciální zesilovač zesiluje rozdíl napětí na jeho kladné a záporné vstupní svorce. Přípravek je napájen stabilizovaným napětím $\pm 12\text{V}$. [9]

Hodnoty součástek:

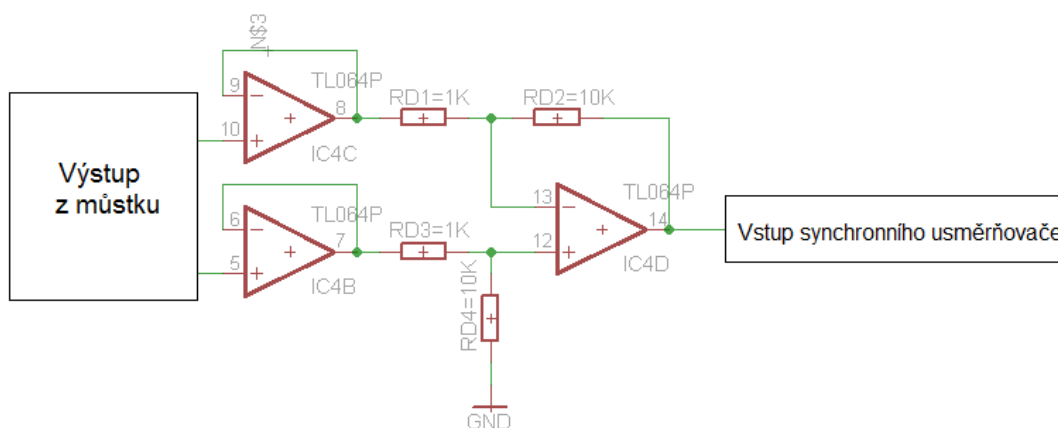
- $R_{D1} = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_{D2} = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_{D3} = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_{D4} = 10 \text{ k}\Omega$

Zesílení:

$$A_U = \frac{R_{D2}}{R_{D1}} = \frac{R_{D4}}{R_{D3}} = 10 \quad (4.3)$$

Výstupní napětí diferenciálního zesilovače:

$$U_{\text{vys}} = \frac{R_{D2}}{R_{D1}} (U_2 - U_1) = \frac{10}{1} (5,5 - 5) = 5V \quad (4.4)$$

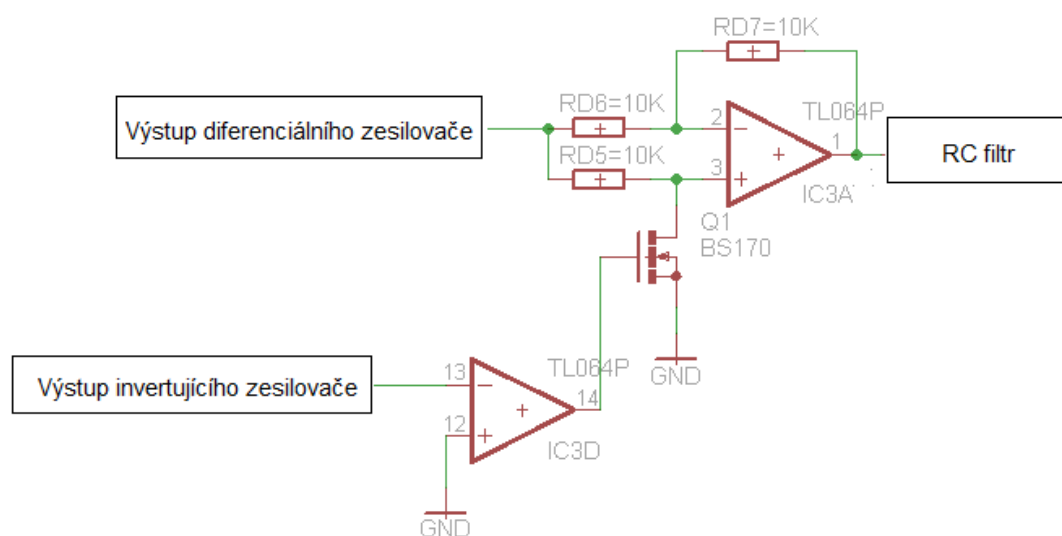


Obr. 16: Sledovače a diferenciální zesilovače.

4.2.6 Synchronní usměrňovač

Hned za diferenciálním zesilovačem je zapojen synchronní usměrňovač sestavený z operačního zesilovače, unipolárního tranzistoru a komparátoru. Usměrňovač slouží k odstranění střídavé složky. Tranzistor slouží jako spínač pro řízené usměrňování.

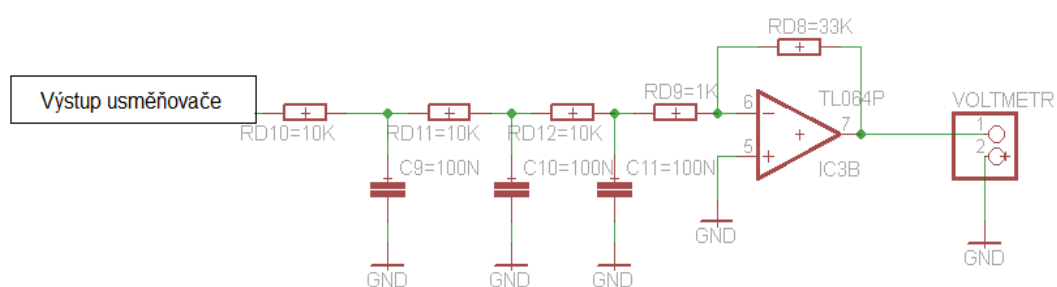
Při kladné půlperiodě generované generátorem je na výstupu komparátoru záporná saturace, tranzistor je uzavřen a zapojení se chová jako sledovač. Při záporné půlperiodě je na výstupu komparátoru kladná saturace, tranzistor se otevře a zapojení se chová jako invertující zesilovač.



Obr. 17: Zapojení synchronního usměrňovače.

4.2.7 RC filtr

Pro odstranění zbytků střídavé složky po usměrnění je v obvodu zařazen pasivní RC filtr třetího řádu typu dolní propusti. Ten vyhlazuje vyšší harmonické frekvence. Za filtrem je zařazen operační zesilovač.



Obr. 18: RC filtr

4.2.8 Nulový indikátor

Jako indikátor zobrazující nulové napětí v můstku je zvolen ručkový voltmetr s rozsahem od -10mV do +10mV. Pro kontrolu a přesnost měření může být zapojen i digitální voltmetr, který slouží jako daleko přesnější indikátor.

4.2.9 Odporová dekáda

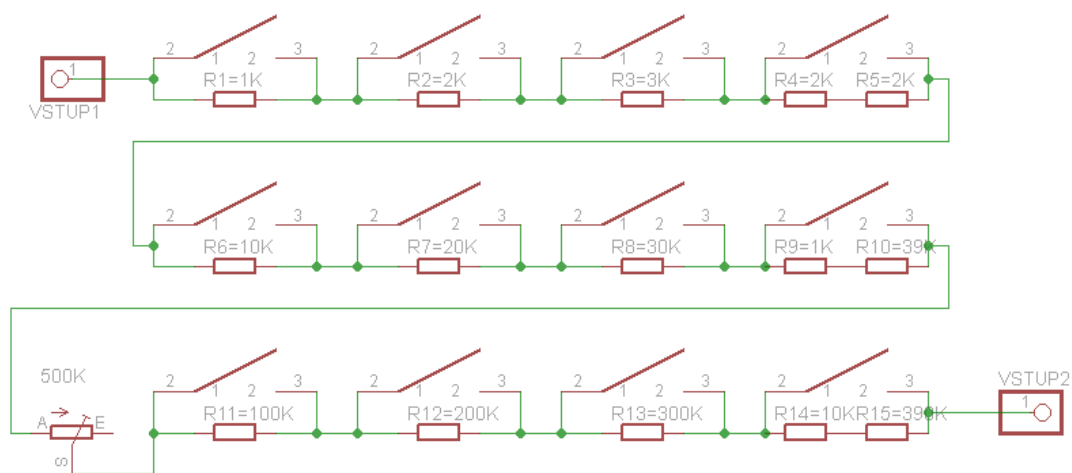
Odporová dekáda je určena pro postupné vyvažování napětí na můstku při měření odporu. Čím více se bude hodnota na dekádě rovnat měřené hodnotě, tím menší bude napětí na můstku. K přepínání jednotlivých hodnot na dekádě slouží dvoupólové tlačítkové spínače.

Zhotovená je ve třech rozsazích:

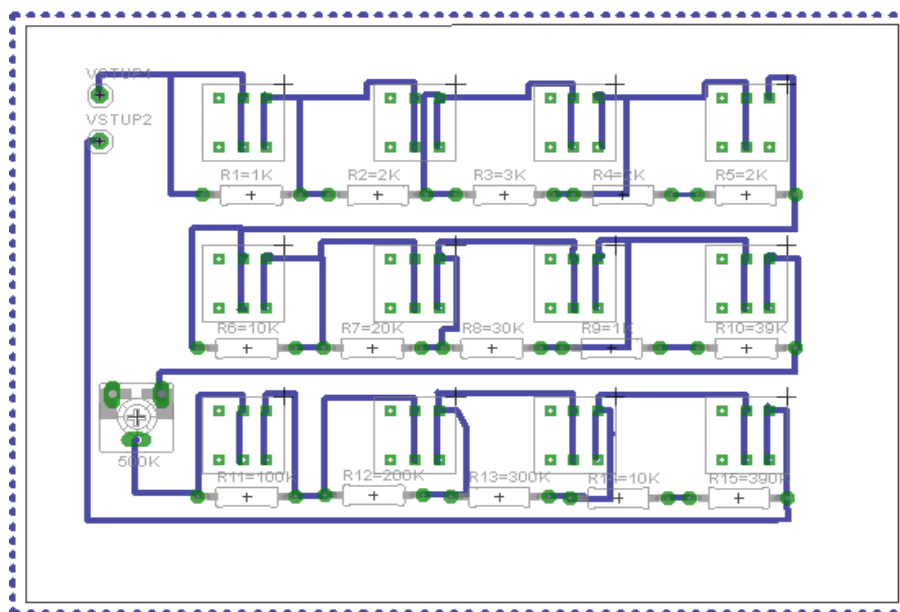
1. rozsah = $1\text{k}\Omega$, $2\text{k}\Omega$, $3\text{k}\Omega$, $4\text{k}\Omega$ = maximální rozsah $10\text{k}\Omega$
2. rozsah = $10\text{k}\Omega$, $20\text{k}\Omega$, $30\text{k}\Omega$, $40\text{k}\Omega$ = maximální rozsah $100\text{k}\Omega$
3. rozsah = $100\text{k}\Omega$, $200\text{k}\Omega$, $300\text{k}\Omega$, $400\text{k}\Omega$ = maximální rozsah $1000\text{k}\Omega$

Všechny odpory jsou řazeny v sérii, tudíž minimální hodnota, kterou lze nastavit na dekádě je $1\text{k}\Omega$ a maximální hodnota je $1,111\text{G}\Omega$. Pro jemnější vyvažování je v obvodu zařazen odporový trimr s maximálním rozsahem $500\text{k}\Omega$.

Návrh obvodu a desky plošných spojů je proveden v programu EAGLE 6.5



Obr. 19: Návrh obvodu odporové dekády.



Obr. 20: Odporová dekáda- DPS.

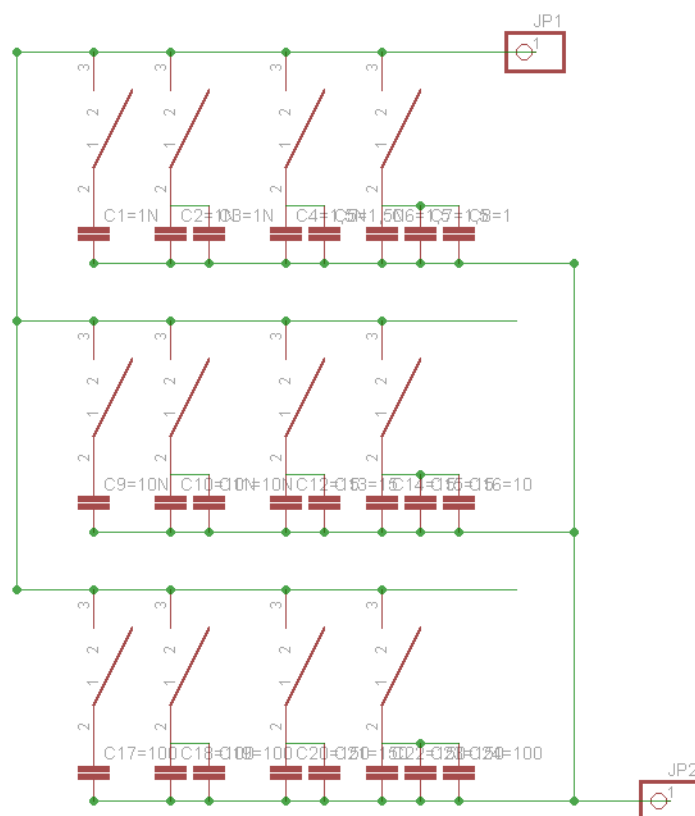
4.2.10 Kapacitní dekáda

Kapacitní dekáda je zhotovena podobným způsobem jako odporová dekáda a je určena k vyvažování napětí na můstku při měření kapacity. Čím více se bude hodnota na dekádě rovnat měřené hodnotě, tím menší bude napětí na můstku.

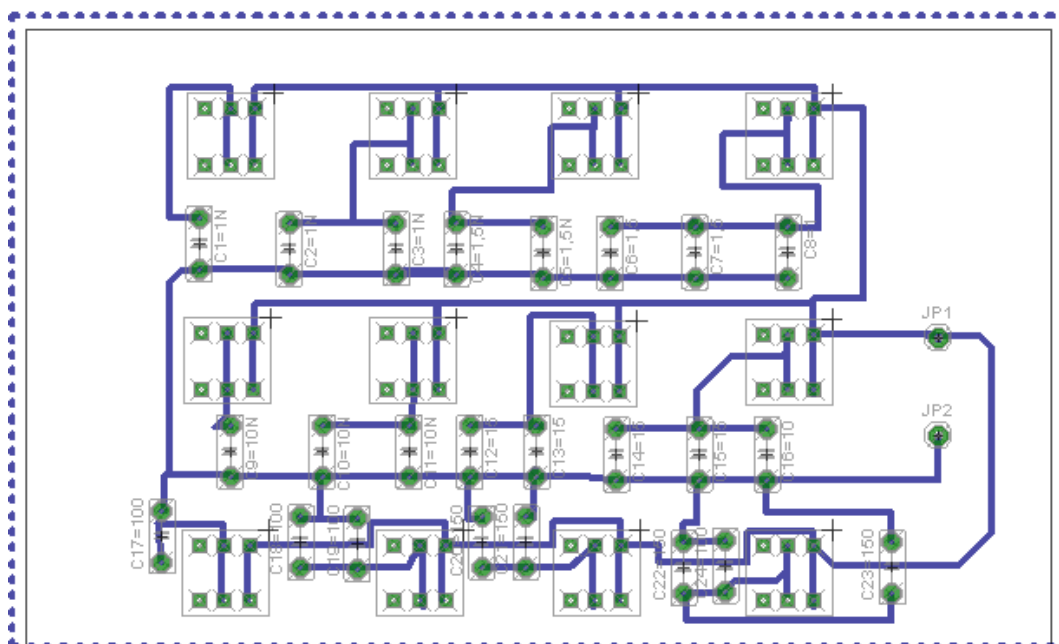
Zhotovena ve třech rozsazích:

1. rozsah = 1 nF , 2 nF , 3 nF , 4 nF = maximální rozsah 10 nF
2. rozsah = 10 nF , 20 nF , 30 nF , 40 nF = maximální rozsah 100 nF
3. rozsah = 100 nF , 200 nF , 300 nF , 400 nF = maximální rozsah 1000 nF

Kondenzátory pro možnost sčítání hodnot jednotlivých rozsahů jsou na rozdíl od odporů řazeny paralelně. Minimální hodnota na dekádě je tedy 1 nF a maximální hodnota je $1,111\text{ }\mu\text{F}$.



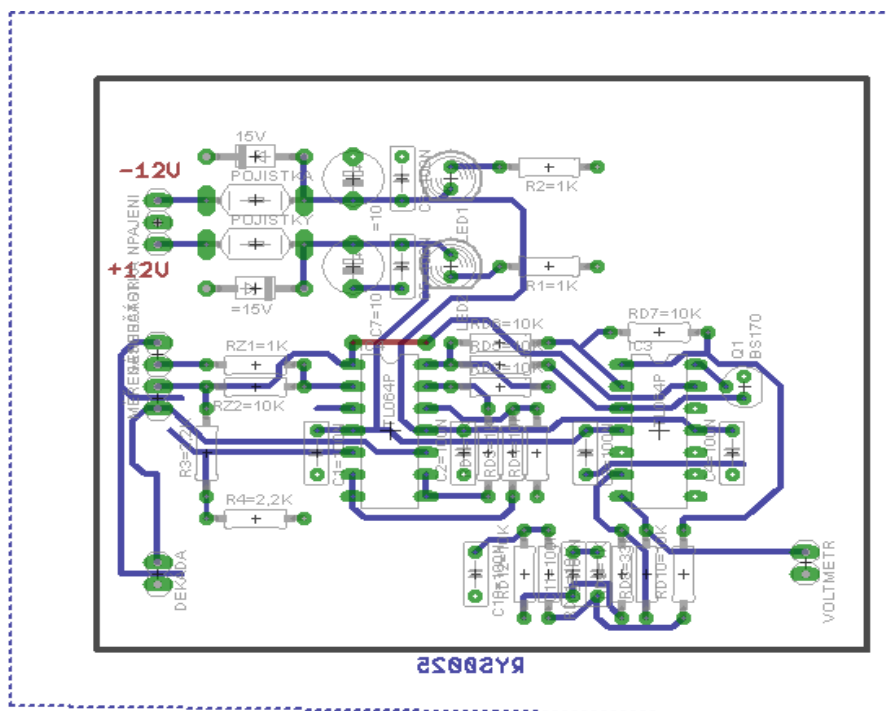
Obr. 21: Návrh kapacitní dekády.



Obr. 22: Kapacitní dekáda – DPS

4.3 Realizace desky plošných spojů můstkového přípravku

Realizace obvodového můstkového přípravku proběhla pomocí programu EAGLE 6.5. Na obou svorkách z externího stabilizovaného zdroje napětí jsou připojeny ochranné pojistky spolu se zenerovými diodami, které slouží jako ochrana proti přepolarizování. Funkčnost obvodu je indikována led diodami s ochranným odporem 1000 Ω . Zbytek zapojení funguje dle popisu na stranách 12-19.



Obr. 23: Schéma desky plošného spoje

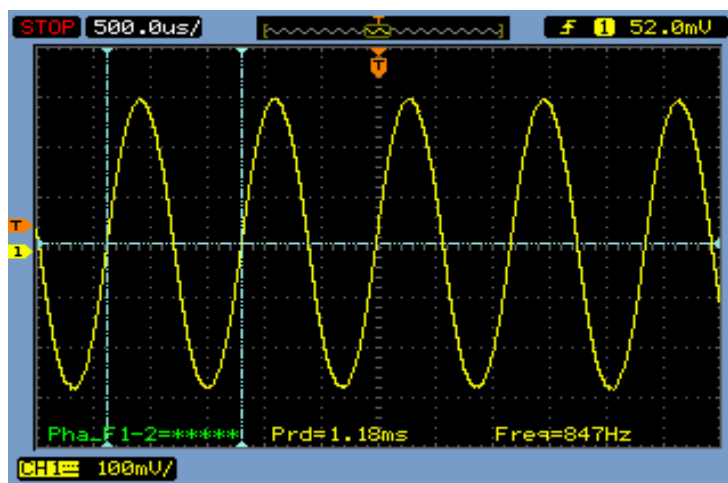
5. Testování měřícího přípravku

Měřící přípravek je zapojen k laboratornímu zdroji, k tomu samému zdroji je připojen i generátor +12V. K daným svorkám je připojena měřená součástka a k ní také příslušná dekáda. Změna napětí je sledována na ručkovém voltmetru a digitálním multimetru.

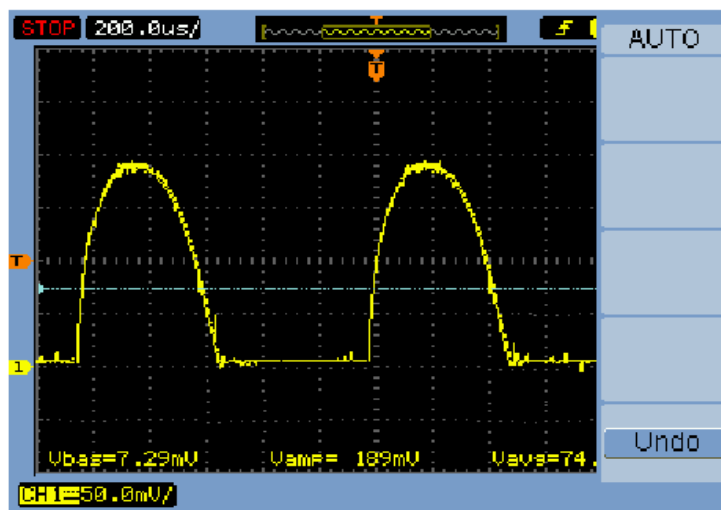
5.1 Průběh napětí obvodem

Pomocí osciloskopu byl sledován průběh napětí na generátoru a synchronním usměrňovači. Na Obr. 24 lze vidět požadovaný sinusový průběh napětí na výstupu generátoru harmonického signálu.

Další průběh napětí byl sledován na výstupu synchronního usměrňovače kde je napětí z generátoru usměrněno – Obr. 25.



Obr. 24: Průběh napětí na generátoru harmonického signálu



Obr. 25: Průběh napětí z výstupu synchronního usměrňovače

5.2 Měření odporu

V této části práce jsou nejprve jednotlivé hodnoty odporu naměřeny pomocí originální odporovou dekádou značky XL6, což je nastavitelný šestimístný etalon. V další části měření je dekáda nahrazena vyrobenou odporovou dekádou a výsledky jsou porovnány.

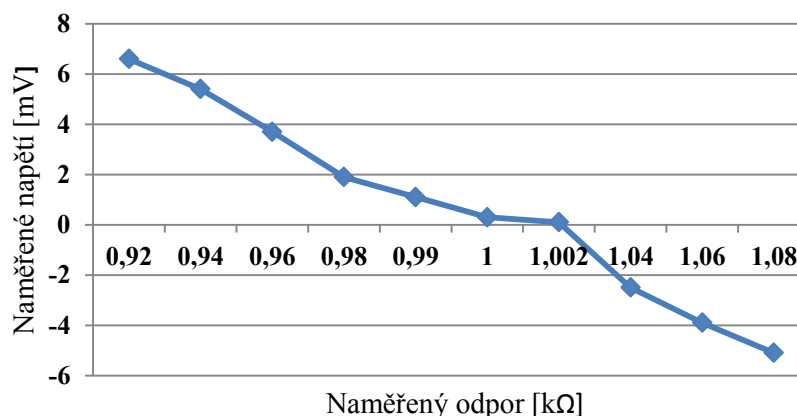
5.2.1 Měření s odporovou dekádou XL6

Odporová dekáda je nastavována postupně podle hodnoty uvedené výrobcem rezistoru. Přepínáním jednotlivých hodnot dochází k vyvažování můstku až k nulové hodnotě zobrazené na nulovém indikátoru - multimetru.

V tab.1 jsou zaznamenány hodnoty nastavené na dekádě pro měřený odpor $1\text{ k}\Omega$. Nejblíže k vyvážení můstku, kdy na multimetru byla téměř nulová hodnota, bylo nastavení na odporové dekádě $1,002\text{ k}\Omega$ při napětí $0,1\text{ mV}$. Tato hodnota je v tabulce zvýrazněna růžovou barvou.

Tab. 1: Pro měřený odpor $1\text{ k}\Omega$.

Dekáda [k Ω]	Naměřené napětí [mV]
0,92	6,6
0,94	5,4
0,96	3,7
0,98	1,9
0,99	1,1
1	0,3
1,002	0,1
1,04	-2,5
1,06	-3,9
1,08	-5,1



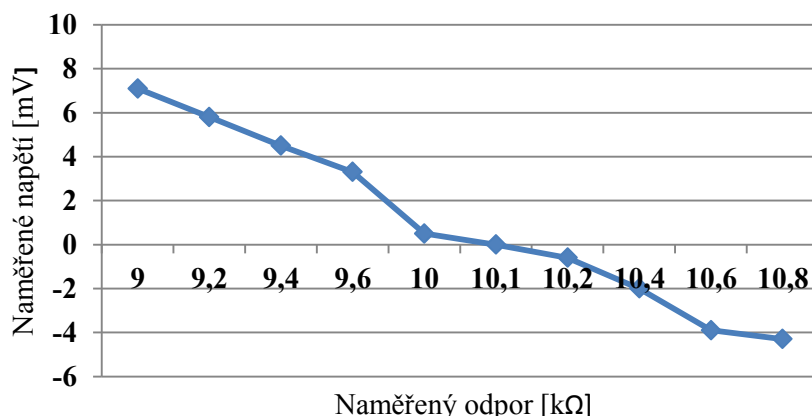
Graf 1: Závislost napětí na změně odporu na dekádě dle tab. 1

Tab. 2: Pro měřený odpor $10\text{ k}\Omega$.

Dekáda [k Ω]	Naměřené napětí [mV]
9	7,1
9,2	5,8
9,4	4,5
9,6	3,3
10	0,5
10,1	0
10,2	-0,6
10,4	-2

10,6	-3,9
10,8	-4,3

Tab. 2 je vytvořena na stejném principu jako tab. 1 pro hodnotu odporu 10k Ω .



Graf 2: Závislost napětí na změně odporu dekády dle tab.2.

5.2.2 Absolutní a relativní chyba měření odporu

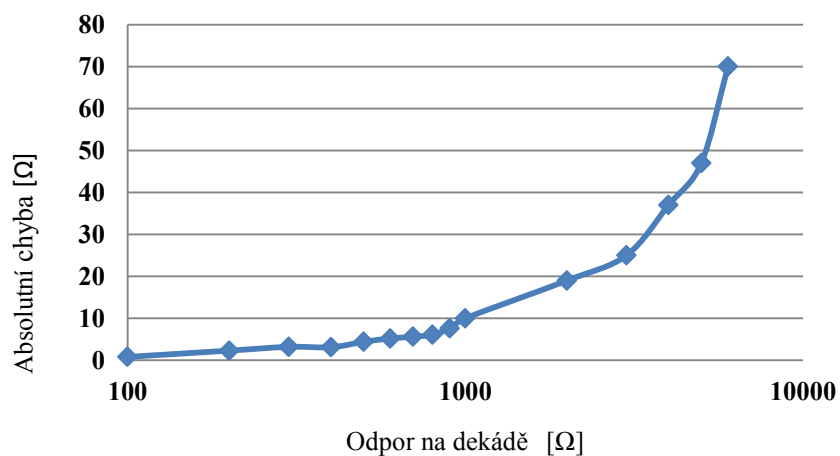
Tato část měření proběhla jako v předchozích bodech, na odporové dekádě byla nastavována hodnota dokud nulový indikátor neindikoval napětí na můstku blízké nule a z dekády byla odečtena hodnota měřeného odporu. Hodnoty měřeného odporu (hodnoty uvedeny výrobcem) a poté naměřené na odporové dekádě jsou uvedeny v tabulce a následovně byla určena absolutní a relativní chyba.

- Absolutní chyba měření - rozdíl mezi naměřenou (hodnota na dekádě) a skutečnou hodnotou (hodnota od výrobce).
- Relativní chyba měření - je poměr absolutní chyby k porovnávané hodnotě.

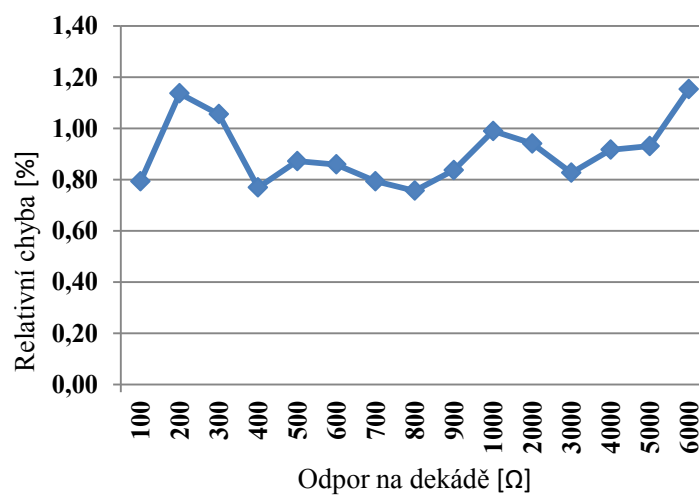
Tab. 3: Absolutní a relativní chyba měření v závislosti na měřeném odporu

R-měřené [Ω]	R- dekáda [Ω]	Absolutní chyba [Ω]	Relativní chyba [%]
100	100,8	0,8	0,79
200	202,3	2,3	1,14
300	303,2	3,2	1,06
400	403,1	3,1	0,77
500	504,4	4,4	0,87
600	605,2	5,2	0,86
700	705,6	5,6	0,79
800	806,1	6,1	0,76
900	907,6	7,6	0,84

1000	1010	10	0,99
2000	2019	19	0,94
3000	3025	25	0,83
4000	4037	37	0,92
5000	5047	47	0,93
6000	6070	70	1,15



Graf 3: Závislost absolutní chyby na naměřeném odporu na dekádě



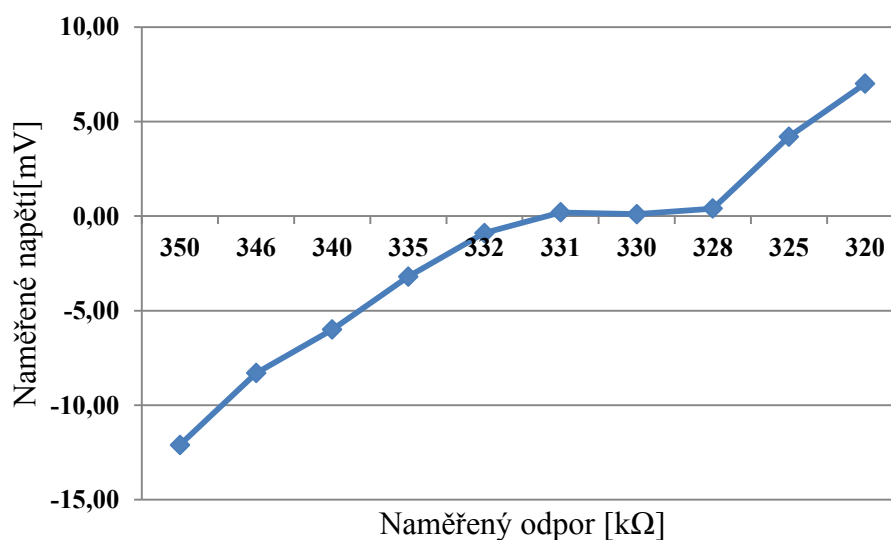
Graf. 4: Závislost relativní chyby na naměřeném odporu na dekádě

5.2.3 Měření odporu na sestavené dekádě

Měření proběhlo na vlastní sestavené odporové dekádě obdobně jako při měření na odporové dekádě XL6. V tabulce 4 jsou zaznamenány změny napětí na můstku v závislosti změny odporu na dekádě při měřeném odporu 330 k Ω . Následně proběhlo měření pro deset různých velikostí odporu a hodnoty byly srovnány s hodnoty uvedených výrobcem při co největším vyvážení.

Tab. 4: Pro měřený odpor 330k Ω

Dekáda [k Ω]	Naměřené napětí [mV]
350	-12,1
346	-8,3
340	-6
335	-3,2
332	-0,9
331	0,2
330	0,1
328	0,4
325	4,2
320	7



Graf 5: Závislost napětí na změně odporu dekády dle tab.4.

Tab. 5: Hodnota odporu udaná výrobcem v porovnání s nastavenou hodnotou odporu na dekádě.

R-měřené [kΩ]	R- dekáda [kΩ]	Napětí[mV]
15	15	-0,2
33	32	0,1
56	56	0,1
82	83	-0,3
100	100	0,1
120	121	0,3
150	149	0,1
470	471	-0,2
560	560	0,1
820	819	0,3

5.3 Měření kapacity

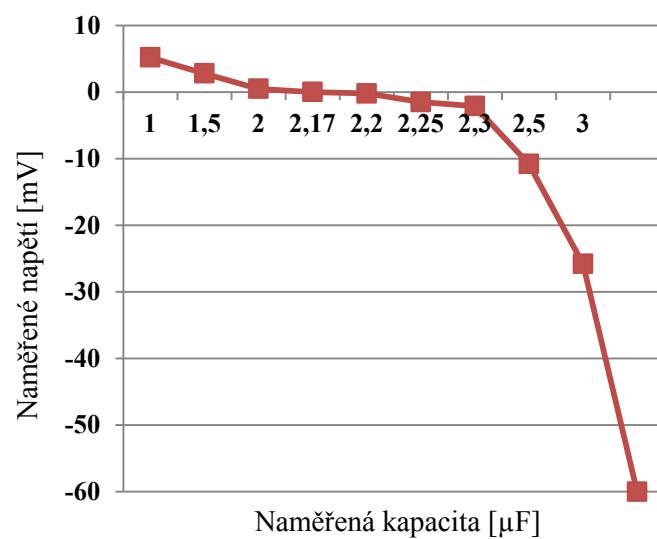
Měření proběhlo podobným způsobem, jako měření odporu . Namísto odporové dekády je k přípravku připojena kapacitní dekáda a měřená součástka je kondenzátor.

5.3.1 Měření s originál dekádou C- BOX 01

Změnou hodnot kapacity na dekádě docházelo ke změně napětí - vyvažování dokud se napětí na můstku neblížilo nulových hodnot. Měření proběhlo pro dva kondenzátory a v tabulkách 6 a 7 jsou uvedeny hodnoty kapacity nastavené na dekádě s postupnou změnou napětí na můstku.

Tab. 6: Pro měřenou kapacitu 2,2 μF

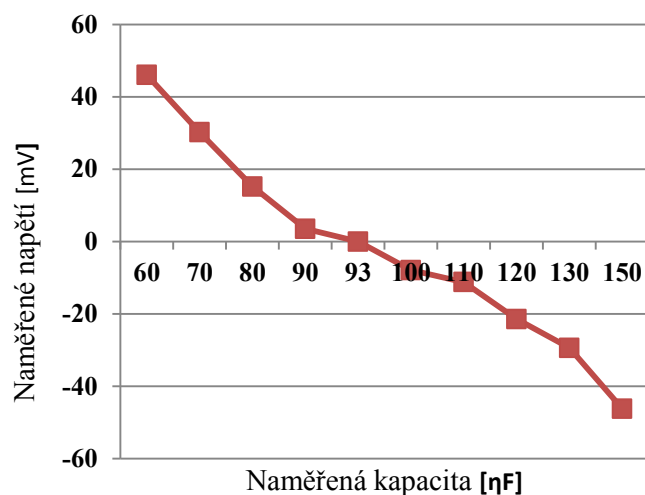
Dekáda [μF]	Naměřené napětí [mV]
1	5,2
1,5	2,8
2	0,5
2,17	0
2,2	-0,2
2,25	-1,5
2,3	-2,1
2,5	-10,8
3	-25,8
4	-60



Graf 6: Závislost napětí na změně kapacity z tab. 6.

Tab. 7: Pro měřenou kapacitu 100 ηF .

Dekáda [ηF]	Naměřené napětí [mV]
60	46
70	30,2
80	15,2
90	3,5
93	0
100	-7,9
110	-11,2
120	-21,4
130	-29,4
150	-46,2



Graf 7: Závislost napětí na změně kapacity z tab. 7

V tomto případě byl použit kondenzátor s hodnotou 100 nF s tolerancí 20% . K vyvážení došlo při hodnotě 93 nF, což může odpovídat dané toleranci.

5.3.2 Měření kapacity na sestavené kapacitní dekádě

Měření na vlastní kapacitní dekádě proběhlo stejným způsobem jako na dekádě C-BOX 01.

Tab. 8: Hodnota kapacity udávána výrobcem v porovnání s nastavenou hodnotou kapacity na dekádě.

C- měřené [nF]	C- dekáda [nF]	Naměřené napětí [mV]
10	11	-0,3
15	12	0,6
33	31	0,2
47	46	0,2
68	71	0,7
100	96	0,8
150	149	0,3
220	223	-0,1
330	328	0,2
420	425	-0,8

Tab. 9: Pro měřenou kapacitu 150 nF

Dekáda [nF]	Naměřené napětí [mV]
120	20,1
130	15,3
140	5,2
145	1,1
150	0,8
155	0,1
160	-4,3
170	-16,2
180	-23,1
200	-46,2

6. Laboratorní úloha

6.1 Cíl úlohy

- Seznámení se s principem můstkových měření
- Pomocí dekád naměřit zadané veličiny
- Vyzkoušet si měření napětí při vyvažování dekád

6.2 Zadání

1. Sestavte můstkový měřicí přípravek dle blokového schématu.
2. Přípravkem pomocí měřících svorek změřte 4 dané rezistory a kondenzátory.
3. Stejně rezistory přeměřte znova multimetrem.
4. Veškeré naměřené hodnoty запиšte do tabulek .

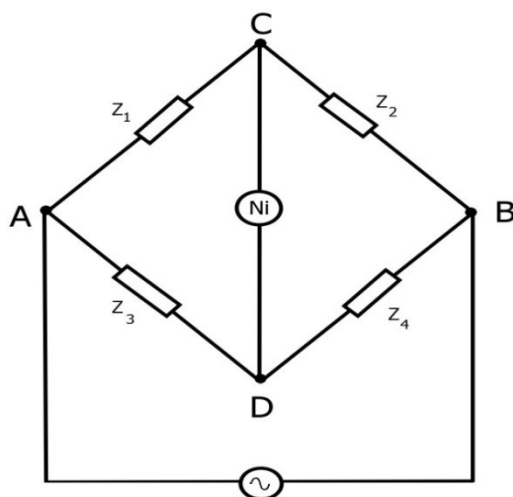
6.3 Použité vybavení

- 1x laboratorní zdroj stabilizovaného napětí +-12V
- Můstkový měřicí přípravek
- Odporová a kapacitní dekáda
- Rezistory, kondenzátory

6.4 Teoretický rozbor

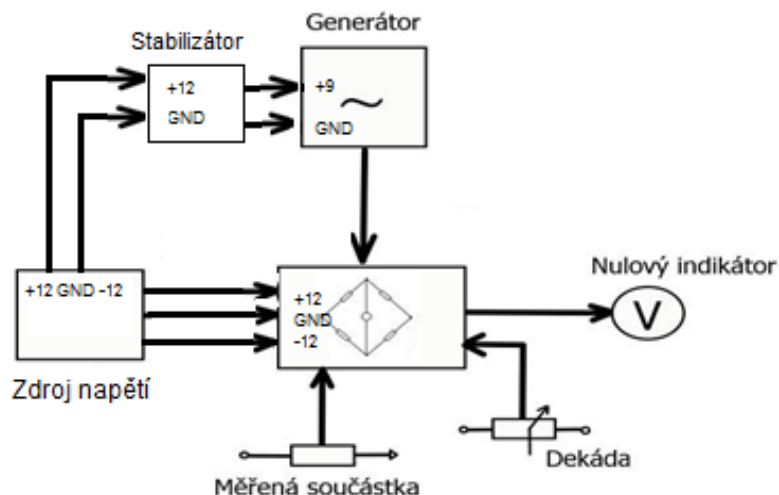
Můstková zapojení se využívají pro měření odporu, kapacity, vlastní a vzájemné indukčnosti. Základní funkce můstku je ta, že provede rozdíl signálu mezi dvěma body C-D - takže výstup je úměrný změnám a konstantní velké hodnoty se eliminují.

Obecný můstek Wheatstoneova typu viz (Obr. 27) se skládá z impedancí Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 kde $Z_1 = Z_X$ je neznámá měřená impedance a Z_2, Z_3, Z_4 jsou známé hodnoty impedancí, z nichž minimálně 2 jsou proměnné. Z_1 je měřená součástka, Z_2 je odporová nebo kapacitní dekáda a Z_3 a Z_4 jsou odpory o stejné pevné hodnotě.



Obr. 27: Obecný můstek

Na tomto principu je sestaven můstkový měřicí přípravek pro měření odporu a kapacity. Přípravek je napájen laboratorním zdrojem, stejně tak i generátor se stabilizátorem, který je již zabudován v přípravku. K přípravku se zvlášť připojuje kapacitní dekáda pro měření kapacity, odporová dekáda pro měření odporu a měřená součástka. Na dekádě jsou postupně nastavovány hodnoty odporů či kondenzátoru dokud indikátor neindikuje napětí blízké nuly na můstku. Při nulovém napětí je můstek ve vyváženém stavu a hodnota nastavená na dekádě odpovídá měřené hodnotě dané součástky.



Obr. 28: Blokové schéma zapojení měřícího přípravku.

6.5 Pracovní postup

6.5.1 K bodu č. 1: sestavení měřícího přípravku

- Měřící přípravek připojte ke stabilizovanému zdroji napětí $\pm 12\text{V}$.
- K výstupu pro voltmetr připojte ještě multimetr s rozsahem mV.

6.5.2 K bodu č. 2: měření hodnot součástek

6.5.2.1 Měření odporu

- K přípravku připojte odporovou dekádu
- K dalším svorkám připojte měřený rezistor
- Nastavujte na dekádě hodnoty tak dlouho, dokud na voltmetru se ručka nepřiblíží k nule, pro přesnost měření odečítejte hodnotu napětí i z multimetru
- Nastavená hodnota dekády, při které bude napětí na můstku nulové (či blízká nule) se rovná měřené hodnotě.

6.5.2.2 Měření kapacity

- K přípravku připojte kapacitní dekádu.
- Ke svorkám připojte měřený kondenzátor
- Opakujte stejný postup měření, jako u měření odporu

6.5.3 K bodu č. 3: hodnoty odporu přeměřte multimetrem

- Naměřené hodnoty odporu přeměřte multimetrem
- Vytvořte graf závislosti skutečných hodnot a hodnot naměřených multimetrem

6.5.4 K bodu č. 4: Záznam hodnot

- Naměřené hodnoty zapište do tabulek
- Vytvořte grafy závislosti napětí na můstku jako funkční závislost měřeného odporu nebo kapacity na naměřeném napětí vyváženého můstku.

6.6 Výsledky měření

Tab. x: Změřené hodnoty rezistorů

č. měření	R - měřené [kΩ]	R - dekáda [kΩ]	Naměřené napětí [mV]
1.	1	1	4,5
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			

Příklad měření

Tab. X: Změřené hodnoty kondenzátorů

č. měření	C - měřené [nF]	C - dekáda [nF]	Naměřené napětí [mV]
1.	2,2	1,5	8,2
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

9.			
10.			

7. Závěr

V zadané bakalářské práci byl vytvořen měřicí přípravek na principu můstkových zapojení. Přípravek je navržen tak, aby měřil odpor a kapacitu – dvě pasivní veličiny. Tento způsob měření se v dnešní době využívá nejčastěji pro přesná laboratorní měření a pro výuku. V praxi se spíše využívají RLC digitální měřáky. Princip tohoto zapojení spočívá ve změně hodnoty odporu či kapacity na dekádě a následné změny napětí na můstku – čím více se hodnota přibližuje nule, tím přesnější je naměřená hodnota odporu, kapacity.

Prvotním cílem bylo důležité seznámit se s principy můstkového zapojení pro každou veličinu zvlášť. Obecné můstkové zapojení vychází ze zapojení Wheatstoneova můstku. Z tohoto zapojení jsou pak obdobným způsobem zapojeny i ostatní typy můstků pro měření odporu, kapacity a indukčnosti. V teoretické části jsou dále uvedeny i základní podmínky, které musí tyto zapojení splňovat.

Realizace celého přípravku byla založena na tom, že pro kapacitu a odpor jsou rozdílné typy zapojení. Ve výsledku došlo ke sloučení dvou typů můstku – Wheatstoneova a Wienova můstku. Samostatný můstkový měřicí přípravek je sestaven z lineárních členů. K vyvažování můstku dochází pomocí odporové a kapacitní dekády - podle měřené veličiny. K detekci napětí na můstku je určen ručkový voltmetr. Toto zapojení bylo nejprve otestováno na nepájivém poli. Můstkový přípravek je napájen z laboratorního zdroje stabilizovaným napětím $\pm 12\text{V}$, aby mohl být ze stejného zdroje napájen i generátor, bylo potřeba ke generátoru zapojit stabilizátor napětí na 9V .

Po vytvoření DPS a napájení všech příslušných součástek, byl přípravek otestován. K prvotnímu testování byla využita laboratorní dekáda - odporová a kapacitní. V této části byla ověřena funkčnost přípravku. Měření odporu proběhlo pro různé velikosti a z naměřených hodnot byla určena absolutní a relativní chyba. Poté byly odpory opět změřeny a postupným nastavováním dekády byla zaznamenána i změna napětí při vyvažování můstku. Ta samá měření proběhla i pro kapacitu. U hodnot kondenzátorů je zaznamenána vždy i tolerance typu součástek. Při měření odporu rostla absolutní chyba s velikostí odporu. Určená relativní chyba se pohybovala kolem 1%.

Další testování proběhlo na vlastních sestavených dekádách. Dekády byly zhotoveny pomocí dvoupólových spínačů a rezistorů, kondenzátorů. Obě dekády mají tři rozsahy.

Literatura

- [1] BARTUŠEK, Karel, Eva GESCHEIDTOVÁ, Radek KUBÁSEK, Jan MIKULKA, Jiří REZ a Miloslav STEINBAUER. Měření v elektrotechnice. 2., přeprac. a dopl. vyd. VUTIAM, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6
- [2] DUFEK, Milan a Václav FAJT. Elektrická měření I: elektrické měřicí přístroje. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1974, 275 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] DRECHSLER, Richard, Milan JÁKL, Jindřich VÍTKOVEC. Elektrická měření II: základní metody. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1972, 275 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [4] KLESKEŇ, Bohumír. Meracie prístroje a meranie I. 4. vyd. Bratislava: SVTL, 1962, 378
- [5] Signálový generátor: MK105 [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/765/357/signalovy-generator-velleman-mk105-cznavod-1.pdf>
- [6] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. Elektrická měření: přístroje a metody. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [7] BARTUŠEK, Karel. Měření v elektrotechnice. 2., přeprac. a dopl. vyd. Brno: VUTIAM, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [8] PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 484 s. ISBN 80-7300-059-8.

Seznam obrázku

- Obr. 1:** Obecný můstek
- Obr. 2:** Vyvážený Wheatstoneův můstek
- Obr. 3:** Nevyvážený Wheatstoneův můstek
- Obr. 4:** Thomsonův můstek
- Obr. 5:** Scheringův můstek
- Obr. 6:** Wienův můstek
- Obr. 7:** Maxwell-Wienův můstek
- Obr. 8:** Zapojení dle Wheatstoneova můstku pro měření odporu
- Obr. 9:** Zapojení dle Wienova můstku pro měření kapacity
- Obr. 11:** Blokové schéma můstkového měřicího přípravku
- Obr. 12:** Zapojení stabilizátoru
- Obr. 13:** Generátor harmonického signálu
- Obr. 14:** Operační invertující zesilovač.
- Obr. 15:** Můstkové zapojení v měřicím přípravku
- Obr. 16:** Standartní zapojení můstku
- Obr. 17:** Sledovače a diferenciální zesilovače.
- Obr. 18:** Zapojení synchronního usměrňovače.
- Obr. 19:** RC filtr
- Obr. 20:** Návrh obvodu odporové dekády.
- Obr. 21:** Odporová dekáda- DPS.
- Obr. 22:** Návrh kapacitní dekády.
- Obr. 23:** Kapacitní dekáda – DPS
- Obr. 24:** Schéma desky plošného spoje
- Obr. 25:** Průběh napětí na generátoru harmonického signálu

Obr. 26: Průběh napětí z výstupu synchronního usměrňovače

Obr. 27: Obecný můstek

Obr. 28: Blokové schéma zapojení

Seznam grafů

Graf 1: Závislost napětí na změně odporu dle tab. 1

Graf 2: Závislost napětí na změně odporu dekády dle tab.2.

Graf 3: Závislost absolutní chyby na naměřeném odporu na dekádě

Graf 4: Závislost relativní chyby na naměřeném odporu na dekádě

Graf 5: Závislost napětí na změně odporu dekády dle tab. 4

Graf 6: Závislost napětí na změně kapacity z tab. 6.

Graf 7: Závislost napětí na změně kapacity z tab. 7

Seznam tabulek

Tab. 1: Pro měřený odpor $1\text{k}\Omega$.

Tab. 2: Pro měřený odpor $10\text{k}\Omega$.

Tab. 3: Absolutní a relativní chyba měření v závislosti na měřeném odporu

Tab. 4: Pro měřený odpor $330\text{k}\Omega$

Tab. 5: Hodnota odporu udaná výrobcem v porovnání s nastavenou hodnotou odporu na dekádě.

Tab. 6: Pro měřenou kapacitu $2,2\text{ }\mu\text{F}$

Tab. 7: Pro měřenou kapacitu 100 nF .

Tab. 8: Hodnota kapacity udávána výrobcem v porovnání s nastavenou hodnotou kapacity na dekádě.

Tab. 9: Pro měřenou kapacitu 150 nF

Seznam použitých vzorců

Vzorec 2.1: Citlivost můstku

Vzorec 2.2: Podmínka rovnováhy Wheatstoneova můstku

Vzorec 2.3: Výpočet měřeného odporu R_x

Vzorec 2.4: Vztah pro vyjádření napětí

Vzorec 2.5: První podmínka rovnováhy Thomsonova můstku

Vzorec 2.6: Druhá podmínka rovnováhy Thomsonova můstku

Vzorec 2.7: Podmínka rovnováhy Scheringova můstku

Vzorec 2.8: První podmínka rovnováhy Scheringova můstku

Vzorec 2.9: Druhá podmínka rovnováhy Scheringova můstku

Vzorec 2.10: Podmínka rovnováhy Wienova můstku

Vzorec 2.11: První podmínka rovnováhy Wienova můstku

Vzorec 2.12: Druhá podmínka rovnováhy Wienova můstku

Vzorec 2.13: Podmínka rovnováhy Maxwell-Wienova můstku

Vzorec 2.14: První podmínka rovnováhy Maxwell-Wienova můstku

Vzorec 2.15: Druhá podmínka rovnováhy Maxwell-Wienova můstku

Vzorec 4.1: Výstupní napětí operačního zesilovače

Vzorec 4.2: Zesílení invertujícího zesilovače

Vzorec 4.3: Zesílení diferenciálního zesilovače

Vzorec 4.4: Výstupní napětí diferenciálního zesilovače

Seznam příloh

Příloha č. 1: Vzorový protokol laboratorní úlohy

Příloha č. 2: Celkové schéma zapojení

Příloha č. 3: Obrázek testování na nepájivé poli

Příloha č. 4: Obrázek celkového zapojení měřícího přípravku

Příloha č. 5: Kapacitní dekáda

Příloha č. 6: Odporová dekáda

Příloha č. 7: Eagle schematic a board pro výrobu DPS můstkového přípravku (CD)

Příloha č. 8: Eagle schematic a board pro výrobu DPS dekád (CD)

Příloha č. 1:

**VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
BIOMEDICÍNSKÝ TECHNIK**

Vzorový protokol

Mostová měření pasivních elektrických veličin

1.1 Zadání

1. Sestavte můstkový měřicí přípravek dle blokového schématu.
2. Přípravkem pomocí měřících svorek změřte 4 dané rezistory a kondenzátory.
3. Stejně rezistory přeměřte znova multimetrem.
4. Veškeré naměřené hodnoty запиšte do tabulek .

1.2 Použité vybavení

- 1x laboratorní zdroj stabilizovaného napětí $\pm 12\text{V}$
- Můstkový měřicí přípravek
- Odporová a kapacitní dekáda
- Rezistory, kondenzátory

1.3 Pracovní postup

1.3.1 Postup k bodu č. 1 zadání

- Nejprve jsem sestavila měřicí přípravek podle blokového schématu a připojila jej k stabilizovanému zdroji napětí $\pm 12\text{ V}$.

1.3.2 Postup k bodu č. 2 zadání

- Ke svorkám jsem připojila měřený rezistor a k přípravku svorkami připojila odporovou dekádu. Odporovou dekádu jsem postupně přepínala, dokud napětí na indikátoru na můstku se neblížilo k nulové hodnotě. Hodnota na odporové dekádě, při které bylo napětí na můstku co nejmenší odpovídala hodnotě skutečné měřeného odporu.
- Odporovou dekádu jsem vyměnila za kapacitní. Další postup byl stejný jako u bodu č. 2.

1.3.3 Postup k bodu č. 3 zadání

- Měřené odpory jsem ještě jednou přeměřila multimetrem a vytvořila graf závislosti skutečných hodnot a hodnot naměřených multimetrem.

1.3.4 Postup k bodu č. 4 zadání

- Všechny naměřené hodnoty jsem uvedla do tabulek.

1.4 Výsledky měření

Tab. 1: Měření odporu

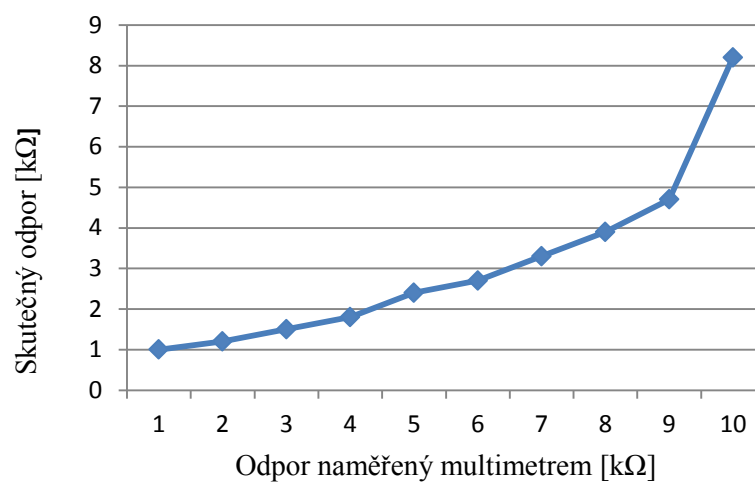
Č. měření	R- měřené [kΩ]	R-dekáda [kΩ]	Naměřené napětí [mV]
1.	1	1,2	8,5
2.	1,2	1,2	0,2
3.	1,5	1,5	0,4
4.	1,8	1,8	-0,2
5.	2,4	2	-6,8
6.	2,7	2,7	0,3
7.	3,3	3,3	0,6
8.	3,9	3,9	-1,2
9.	4,7	4,7	0,7
10.	8,2	8,2	-0,3

Tab. 2 : Měření kapacity

Č. měření	C- měřené [nF]	C-dekáda [nF]	Naměřené napětí [mV]
1.	1	1	4,5
2.	1,2	1,2	5,3
3.	1,5	1,5	4,2
4.	2,2	2,2	6,6
5.	2,7	2,4	-8,6
6.	3,3	3,3	6,4
7.	4,7	4,7	-4,1
8.	6,8	6,8	-3,1
9.	10	10	5,2
10.	15	15	-6,3

Tab. 3: Porovnání skutečných hodnot odporu s naměřenými hodnotami multimetrem

R- měřené(skutečné) [kΩ]	R-Multimetr [kΩ]
1	0,99
1,2	1,1
1,5	1,45
1,8	1,79
2,4	2,36
2,7	2,68
3,3	3,25
3,9	3,88
4,7	4,65
8,2	8,19

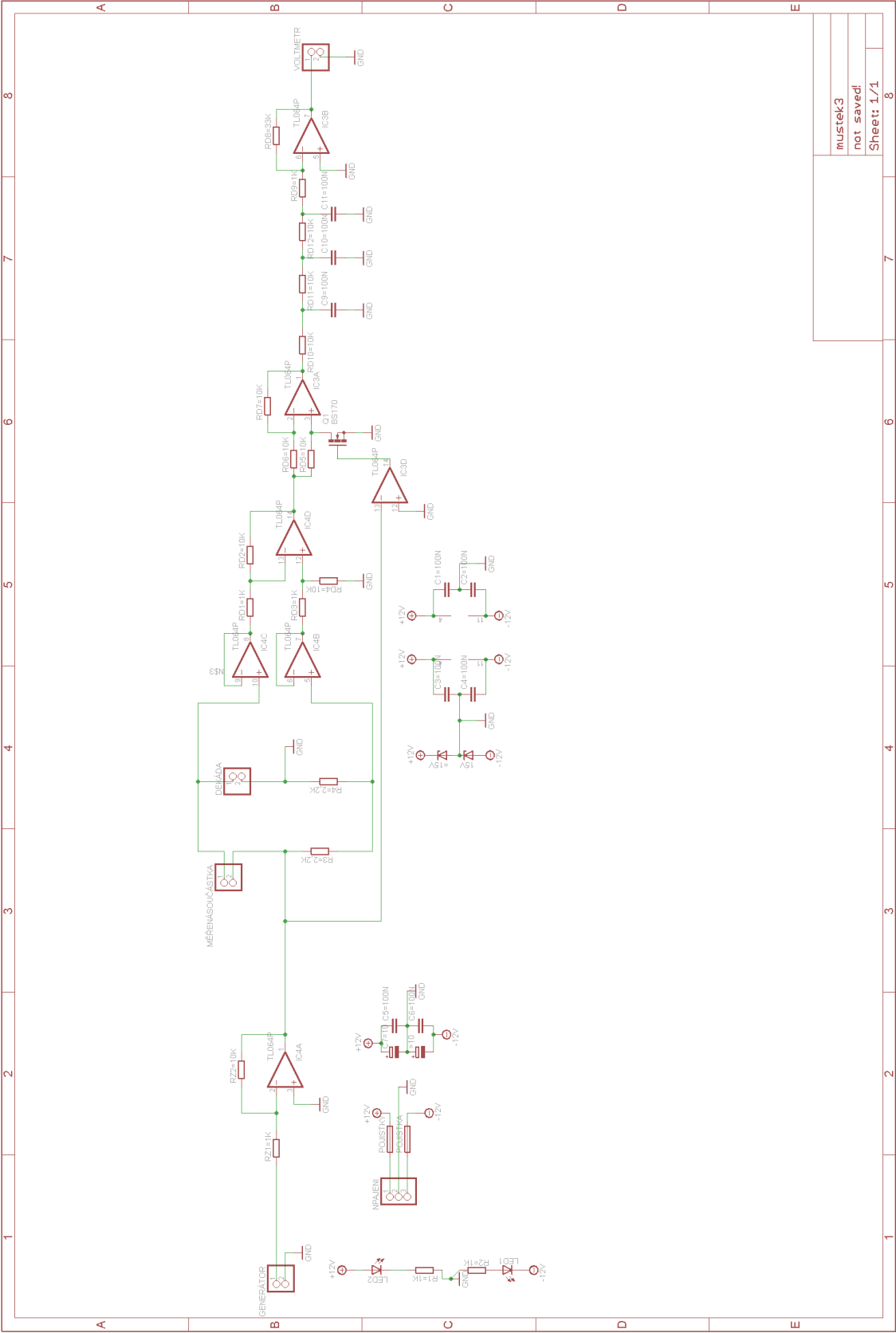


Graf 1: závislost skutečného odporu na odporu naměřeného multimetrem.

1.5 Závěr

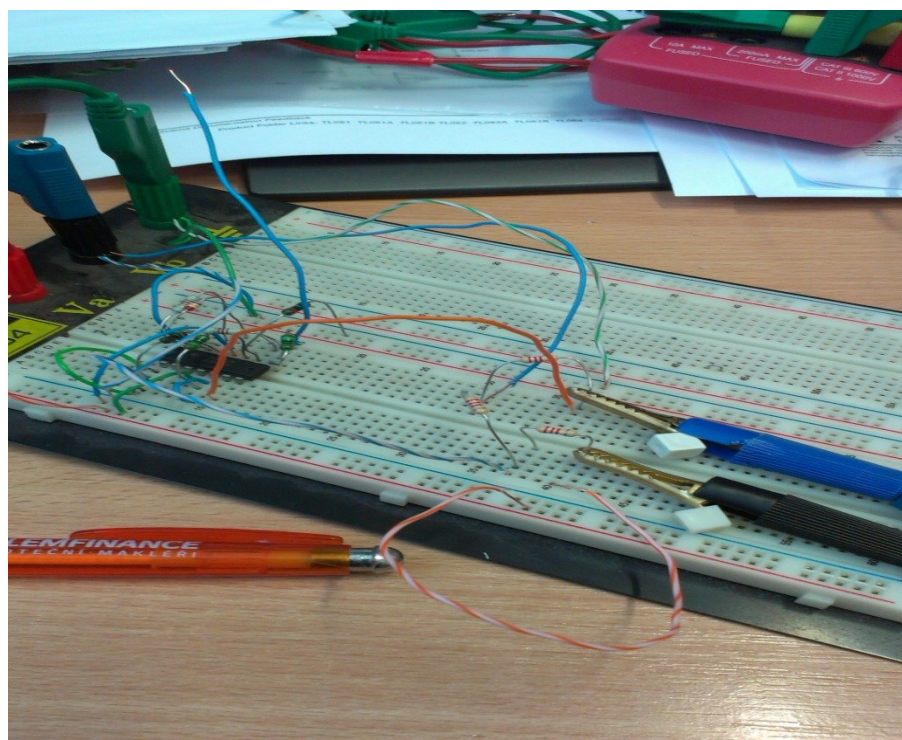
V této laboratorní úloze bylo možné otestovat princip můstkového měření. To je založené na postupném snižování napětí na můstku, při tom dochází k vyvažování můstku.

Příloha č. 2: Celkové schéma zapojení:



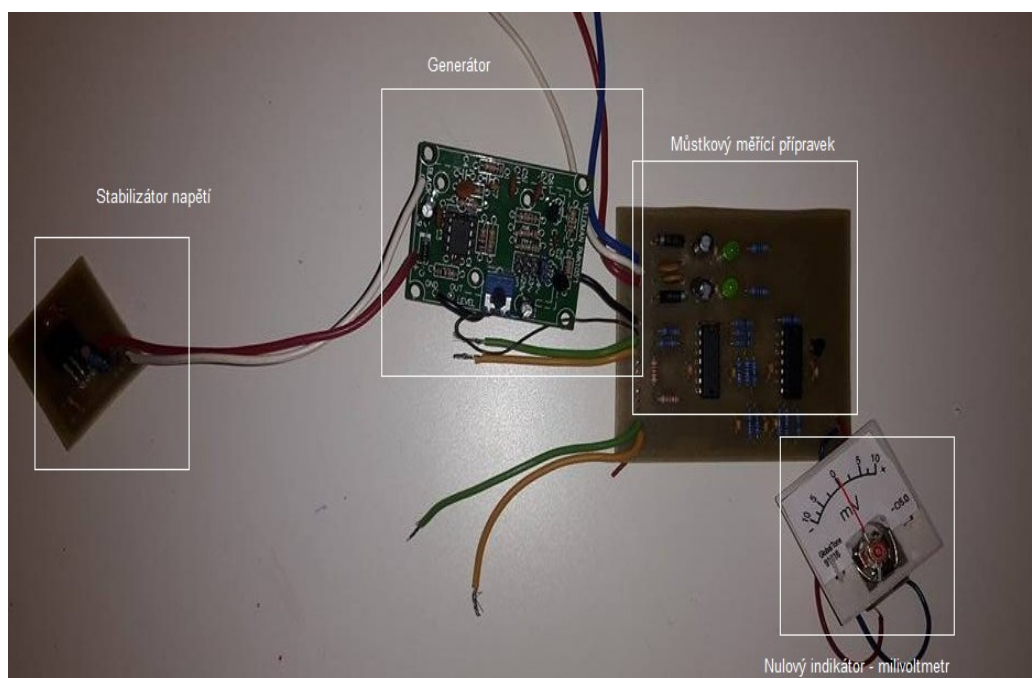
mustek3	8
not saved!	7
Sheet: 1/1	6

Příloha č. 3: Obrázek testování na nepájivé poli:



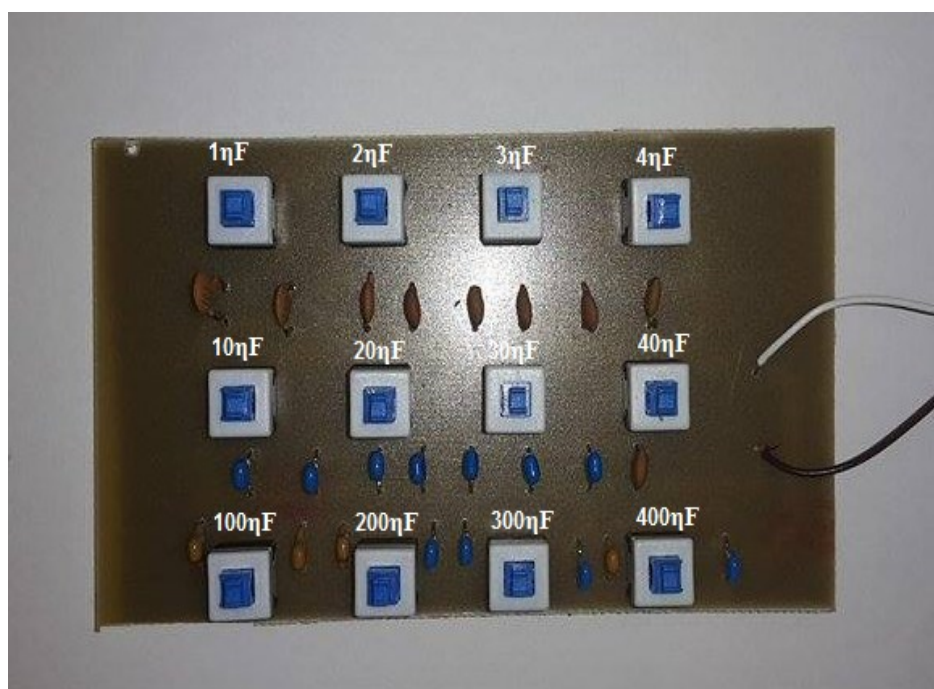
Obr. 1: testování na nepájivé poli

Příloha č. 4: Obrázek celkového zapojení měřícího přípravku:



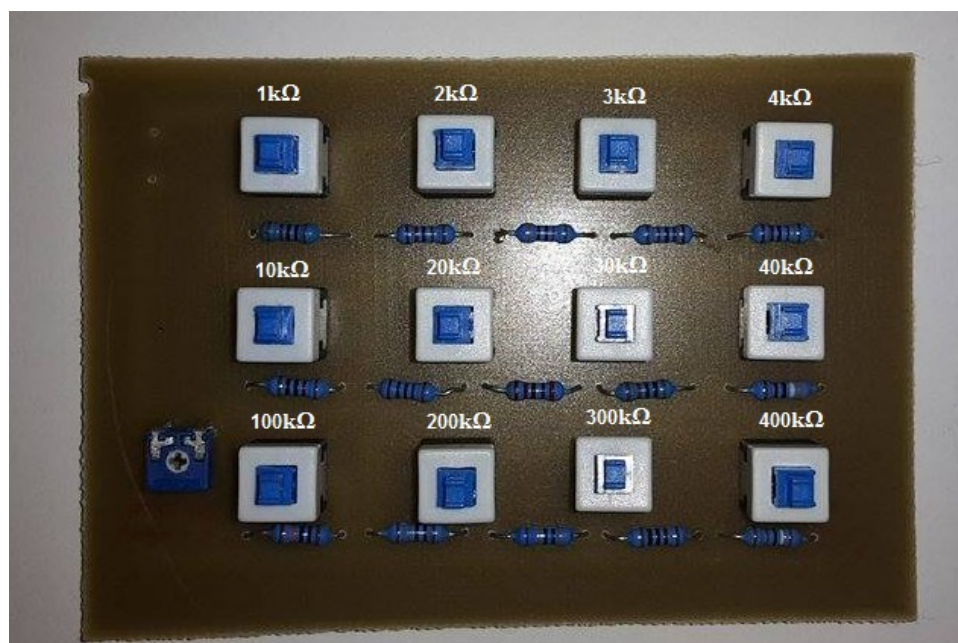
Obr. 2: celkového zapojení měřícího přípravku

Příloha č. 5: Obrázek kapacitní dekády



Obr. 3: Kapacitní dekáda

Příloha č. 6: Obrázek odporové dekády



Obr. 4: Odporová dekáda